

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie mécanique

**CONCEPTION ET FABRICATION D'UN MATELAS AJUSTABLE,
PERSONNALISABLE POUR L'OPTIMISATION DU CONFORT STATIQUE ET
DYNAMIQUE EN TEMPS RÉEL**

Mémoire de maîtrise

Spécialité : Génie mécanique

Marianne LEROUX

Jury :

Alain DESROCHERS (codirecteur)

Ève LANGELIER

Patrice MASSON (rapporteur)

Denis RANCOURT (directeur)

RÉSUMÉ

Les humains passent près d'un tiers de leur vie à dormir. Le sommeil, nécessaire à la réadaptation du système musculosquelettique et du système nerveux, diminue la sensation de fatigue et évite les déficiences de performance cognitive et motrice. Un matelas non adapté à nos besoins est l'un des facteurs principaux affectant la qualité du sommeil. Ainsi le choix d'un bon matelas est primordial afin d'assurer un sommeil réparateur.

Cependant, comme tout individu possède une physiologie unique, le matelas optimal pour chacun doit être personnalisé. L'objectif est donc de faire la conception et la fabrication d'un matelas ajustable et personnalisable, permettant de réduire les forces de cisaillement intervertébrales qui agissent dans notre corps en position couchée. Ainsi, le matelas conçu est doté de 15 sections horizontales à rigidité variable, permettant d'obtenir un profil personnalisé avec ajustement en temps réel. La personnalisation d'un confort en position couchée se définit comme étant une série de segments soutenue par une certaine force à une position définie.

Ainsi, afin d'atteindre un profil personnalisé pour chaque individu, l'utilisation de guides linéaires et d'un système pneumatique complexe a fait l'objet d'une étude détaillée. Le matelas conçu est également analysé dans le but de construire un outil unique à la compréhension du confort en position couchée tout en répondant au besoin du client.

Cet outil, aussi appelé matelas ajustable et simulateur dans cet ouvrage, permettra de tester plusieurs rigidités pneumatiques différentes pour un même profil personnalisé donné. Finalement, pour donner suite aux apprentissages faits avec ce matelas, des recommandations de conception de produit seront données au client afin de transformer le matelas en produit commercial dans les prochaines années.

Mots clés :

Sommeil, confort, matelas ajustable, profil personnalisé, rigidité variable, simulateur, système pneumatique

REMERCIEMENTS

Deux années et demie se sont maintenant écoulées depuis le début de ma maîtrise type recherche en génie mécanique à l'Université de Sherbrooke. Pour souligner la fin de cette aventure, j'aimerais remercier en tout premier lieu François Martel, le collègue à tout faire. En plus de m'avoir soutenue dans toutes les phases du projet, François a été mon plus proche confident et ami pendant ces deux années. Ensuite, j'aimerais remercier mes autres collègues pour leurs blagues et la musique (beaucoup trop forte) qui mettaient une ambiance plaisante dans le laboratoire. Je ne peux passer outre mon directeur de maîtrise, Denis Rancourt, pour son écoute, sa compréhension et ses suggestions parfois divergentes au projet. Son ouverture d'esprit m'a même permis de passer trois mois en Afrique avec Ingénieurs sans Frontières Québec ce qui me permet d'améliorer ma patience et ma communication dans un milieu interculturel. Finalement, merci à mon codirecteur, Alain Desrochers, pour son appui dans le projet et pour toutes ses idées à la fois sensées et farfelues!

Ensuite, je ne remercierai jamais assez Catherine Véronneau, ma copine, ma meilleure amie et la seule femme au monde qui a écouté avec la plus grande des attentions, toutes mes péripéties au laboratoire de recherche.

Les derniers remerciements vont aux premières femmes du domaine de la recherche scientifique. Bien que les femmes soient encore sous-représentées en science et en génie, ces ambassadrices ont ouvert la porte à l'égalité et à l'équité. La société se doit de miser sur tous les talents pour être innovante et exceller en recherche. Ainsi, les femmes n'ont pas à se sentir abaissées de travailler et de progresser dans leur carrière dans un environnement majoritairement masculin, mais à la fois de plus en plus égalitaire et innovant.

Table des matières

| | |
|---|----|
| RÉSUMÉ | i |
| REMERCIEMENTS | ii |
| CHAPITRE I..... | 1 |
| 1 INTRODUCTION..... | 1 |
| 1.1. Mise en contexte & problématique | 1 |
| 1.2. Définition du projet | 2 |
| 1.2.1 Modèle d'un corps humain | 3 |
| 1.2.2 Outil instrumenté..... | 5 |
| 1.3. Objectifs du projet de recherche | 6 |
| 1.3.1 Objectif général..... | 6 |
| 1.3.2 Objectifs spécifiques | 6 |
| 1.4 Contributions originales | 6 |
| 1.5 Plan du document | 7 |
| CHAPITRE II | 8 |
| 2 ÉTAT DE L'ART | 8 |
| 2.1. Interactions Humain-matelas | 8 |
| 2.1.1. Interactions mécaniques | 8 |
| 2.1.2. Interactions sensorielles | 13 |
| 2.2. Matelas innovants..... | 14 |
| 2.2.1. Matelas à zonage..... | 14 |
| 2.2.2. Entreprise Dorsoo | 15 |
| 2.2.3. Entreprise Westend Bed compagny | 16 |
| 2.2.4. Technologie NUBA™ de Matelas René | 17 |
| 2.2.5. Brevet « Mattress structure É.-U. 6996865B2 »..... | 18 |
| 2.3. Stratégies de conception d'un matelas personnalisé | 19 |
| CHAPITRE III..... | 21 |
| 3. CRITÈRES DE CONCEPTION | 21 |

| | | |
|-------------|--|----|
| 3.1 | Cahier des charges..... | 21 |
| 3.1.1. | Liste des besoins | 21 |
| 3.1.2. | Analyse fonctionnelle..... | 22 |
| 3.1.3. | Spécifications..... | 24 |
| CHAPITRE IV | | 26 |
| 4 | CONCEPTION DÉTAILLÉE DU MATELAS..... | 26 |
| 4.1 | Système de guidage..... | 27 |
| 4.1.1 | Roulettes..... | 28 |
| 4.1.2 | Cage de contact en bois | 31 |
| 4.1.3 | Extrusion personnalisée..... | 34 |
| 4.2 | Système de suspension | 36 |
| 4.2.1 | Étude d'une suspension à ressorts..... | 36 |
| 4.2.2 | Description du système pneumatique..... | 38 |
| 4.3 | Système mécatronique..... | 39 |
| 4.3.1 | Choix du profil de suspension | 40 |
| 4.3.2 | Transmission de puissance pneumatique | 41 |
| 4.4. | Système structure | 44 |
| CHAPITRE V | | 46 |
| 5 | CARACTÉRISATION DU MATELAS | 46 |
| 5.1. | Abstract..... | 47 |
| 5.2. | Introduction..... | 48 |
| 5.3. | Simulator pneumatic model..... | 50 |
| 5.4. | Pneumatic system design..... | 53 |
| 5.4.1. | Simulator components design..... | 56 |
| 5.4.2. | Vertical motion module..... | 57 |
| 5.4.3 | Pneumatic control system..... | 58 |
| 5.5 | Experimental method for simulator characterization | 59 |
| 5.5.1 | Position steady state characterization..... | 60 |
| 5.5.2 | Dynamic characterization | 60 |

| | | |
|--|---|-----|
| 5.6 | Results | 61 |
| 5.6.1 | Static equilibrium results | 61 |
| 5.6.2 | Dynamic results | 63 |
| 5.6.3 | Friction force magnitude | 65 |
| 5.6.4 | Impact of piston velocity on friction | 65 |
| 5.6.5 | Preliminary investigation of non-local memory on friction | 66 |
| 5.7 | Discussion..... | 67 |
| 5.8 | Conclusion | 69 |
| 5.9 | Acknowledgment & funding | 70 |
| 5.10 | References..... | 70 |
| CHAPITRE VI..... | | 72 |
| 6 | RECOMMANDATIONS AU CLIENT | 72 |
| 6.1. | Coût du prototype..... | 72 |
| 6.2. | Gestion des risques mécaniques..... | 73 |
| 6.3. | Discussion..... | 74 |
| CHAPITRE VII..... | | 76 |
| CONCLUSION | | 76 |
| LISTE DE RÉFÉRENCES | | 78 |
| Annexe A - Dessin de l'extrusion fabriquée par <i>Extrudex Inc.</i> | | A |
| Annexe B – Schéma électrique global du lit ajustable | | B |
| Annexe C – Code C++ Arduino (Système mécatronique) | | C-1 |
| Annexe D – Proposition du matelas ajustable commercial | | D-1 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1-1 : Concept préliminaire à 15 lattes transverses. Ref : Matelas crée par François Martel, 2015, professionnel de recherche, laboratoire MSD Création ----- | 3 |
| Figure 1-2 : Modélisation d'un corps humain à l'aide d'un système de masses-ressorts. - | 3 |
| Figure 1-3 : DCL sur un segment du corps humain ----- | 4 |
| Figure 1-4 : Lit instrumenté. Réf : Projet de maîtrise à Tong Zhang, étudiant Université de Sherbrooke 2017 ----- | 5 |
| Figure 1-5 : Exemple d'un profil statique, composé d'une position et d'une force de réaction par segment, d'un individu d'une grandeur de 172 cm et de masse 58,9 kg couché sur le dos ----- | 6 |
| Figure 2-1 : Géométrie de la colonne vertébrale en position latérale en fonction de la raideur du matelas, a) Matelas de raideur élevée, b) Matelas de raideur fiable (Haex, 2004) ----- | 9 |
| Figure 2-2 : Colonne vertébrale en position neutre (Haex, Sloten, & Audekercke, 1996)- | 9 |
| Figure 2-3 : a) Insertion d'un ballon non gonflé sous une personne b) Insertion d'un ballon gonflé sous une personne pour répartir la pression (Normand et coll., 2005)----- | 10 |
| Figure 2-4 : Position du corps pour cinq matelas de différentes raideurs (<i>Aoi et coll. 2015</i>) ----- | 10 |
| Figure 2-5 : Illustration d'un corps humain et de ses axes de rotation principaux en position couchée----- | 11 |
| Figure 2-6 : Figure présente dans le brevet de H. Beckman, 1966 ----- | 11 |
| Figure 2-7 : Figure 1 et 2 du brevet (Ikeda, 1981)----- | 12 |
| Figure 2-8 : Figure 1 du brevet (Sanderson Kluft, 2001)----- | 12 |
| Figure 2-9 : Température du corps en fonction d'un lit confortable et inconfortable (Lee and Park, 2006)----- | 13 |
| Figure 2-10 : Discrétisation d'un matelas en zones de raideur différentes Zhu et coll. (2011).----- | 14 |
| Figure 2-11 : Matelas à zones de raideur différentes (version 1) par <i>Evergreen Comfort Industrie</i> ----- | 15 |
| Figure 2-12 : Matelas à zones de raideurs différentes (version 2) par <i>Evergreen Comfort Industries</i> ----- | 15 |
| Figure 2-13 : Matelas de l'entreprise Dorsoo (Hoorn, Dorsoo BE) ----- | 16 |

| | |
|--|----|
| Figure 2-14 : Type <i>Nottinblu</i> de l'entreprise <i>Westend Bed Compagny</i> ----- | 16 |
| Figure 2-15 : Flexion des sections de la marque <i>Nottinblu</i> ----- | 17 |
| Figure 2-16 : Figure 1 du brevet Sabin, (2006) : un système à interdépendance de ressorts ----- | 18 |
| Figure 2-17 : Modèle simplifié de la mécanique d'une surface de confort (S.Rithalia et L.Kenney, 2000) ----- | 19 |
| Figure 2-18 : Exemple de surface de confort qui change de raideur pour atteindre n'importe quel point de la courbe force-déplacement. a. Exemple issue de la physiologie humaine. b. Approche utilisée par Denninger et coll., (2011) pour la conception de la technologie NUBA™ ----- | 19 |
| Figure 2-19 : Technologie à cubes évidés NUBA™, <i>Matelas René inc.</i> (Denninger et coll., 2011)----- | 20 |
| Figure 2-20 : Exemple de surface de confort avec ressort pré-comprimé, permettant atteindre n'importe quel point de la courbe force-déplacement----- | 20 |
| Figure 3-1 : Arbre fonctionnel du matelas ----- | 22 |
| Figure 3-2 : Arbre fonctionnel du produit ----- | 22 |
| Figure 4-1 : Vue globale du dessin 3D du matelas ajustable ----- | 26 |
| Figure 4-2 : Vue latérale du matelas ajustable ----- | 26 |
| Figure 4-3 : Composantes du système de guidage----- | 27 |
| Figure 4-4 : Exemples de système à 1 ddl, tiré de Fundamentals of Design du MIT, (2012) ----- | 28 |
| Figure 4-5 : Analyse du guidage d'une latte pour un modèle centralisé ----- | 29 |
| Figure 4-6 : Coefficient de frottement d'un système à friction en fonction de la force de frottement ----- | 30 |
| Figure 4-7 : Diamètre extérieur des roulettes enduit de polyuréthane 90A de 1,250 po - | 31 |
| Figure 4-8 : Assemblage de la cage de contact en bois ----- | 32 |
| Figure 4-9 : Tolérance longitudinale de la rectitude d'un profil BOSH (Bosch Rexroth Corp, 2011) ----- | 32 |
| Figure 4-10 : Fixation de la cage de contact en bois ----- | 33 |
| Figure 4-11 : Contrainte induite dans le matériau, selon la méthode de Von Mises, pour une déformation définie à 0.0905 po, avec le logiciel ANSYS. ----- | 34 |
| Figure 4-12 : Extrusion personnalisée a) dessinée sur SolidWorks b) Extrusion de la compagnie----- | 35 |

| | |
|--|----|
| Figure 4-13 : Exigences imposées par Extrudex sur la géométrie de l'extrusion personnalisée ----- | 35 |
| Figure 4-14 : Entités du système de suspension ----- | 38 |
| Figure 4-15 : Composants du système du capteur laser pour le choix du profil de suspension ----- | 41 |
| Figure 4-16 : Schéma de transmission de puissance pneumatique ----- | 41 |
| Figure 4-17 : Composants mécaniques pneumatiques utilisés :----- | 43 |
| Figure 4-18 : Modularité du matelas ----- | 45 |
| Figure 6-1 : Représentation du diagramme en camembert du coût du prototype par système ----- | 72 |
| Figure D-1 : Exemple de conception d'une version future de lit ajustable à profils ajustables ----- | 1 |
| Figure D-2 : Vue de face de la version future de lit ajustable à profils ajustables ----- | 1 |
| Figure D-3 : Vue de haut (à vol d'oiseau) de la version future de lit ajustable à profils ajustables ----- | 2 |
| Figure D-4 : Vue de haut (à vol d'oiseau) de la version future de lit ajustable à profils ajustables ----- | 2 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 3-1 : Cahier des charges | 24 |
| Tableau 4-1 : Spécifications du système de guidage..... | 27 |
| Tableau 4-2: Propriétés de l'acétal (Delrin®) (cf.Grades of Delrin ® DuPont TM Delrin ® É.-U.) | 34 |
| Tableau 4-3 : Spécifications du système de suspension..... | 36 |
| Tableau 4-4 : Spécifications du système de mécatronique | 39 |
| Tableau 4-5 : Spécifications du système structure..... | 44 |

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1. Mise en contexte & problématique

Les humains passent près d'un tiers de leur vie à dormir. Le sommeil, nécessaire à la réhabilitation du système musculosquelettique et du système nerveux, diminue la sensation de fatigue et évite les déficiences de performance cognitive et motrice (Jacobson et coll., 2007, Radwan et coll., 2015).

Les principaux facteurs qui affectent la qualité du sommeil sont l'anxiété, les douleurs, la consommation de substances additives (caféine, alcool, nicotine), le manque d'exercice physique et un matelas non adapté à nos besoins (Lei et coll., 2009). Le confort sur un matelas est un phénomène complexe basé sur un sentiment subjectif, qui dépend de l'âge, du sexe, mais aussi des propriétés physiques à l'interface du corps humain (Hänel et coll., 1997).

Dans un sondage, 95% des chirurgiens orthopédiques croient que le matelas joue un rôle important pour les maux de dos (Normand et coll., 2005). Cependant, le confort physique apparaît personnel à chacun et c'est pourquoi le choix d'un matelas en magasin peut être bien difficile.

Il existe deux types de confort soit : le confort qualitatif et le confort quantitatif. Le confort qualitatif est relié à ce que l'on ressent physiquement, basé sur une opinion subjective. C'est à cause de confort recherché que nous changeons de position pendant la nuit. En revanche, il est souvent difficile de déterminer l'amplitude, et la position exacte de cet inconfort. C'est donc sur des données quantitatives (le confort quantitatif), que les scientifiques se basent afin d'évaluer l'ampleur d'un inconfort dans des domaines connexes, dont le sport.

Le matelas joue un rôle important au niveau du confort puisqu'il permet d'équilibrer la principale et seule force qui agit sur notre corps en position couchée : la gravité (Normand et coll., 2005). L'effet de cette force peut avoir un effet négatif puisqu'elle augmente la pression sur certaines régions du corps avec le matelas telles que des protubérances osseuses ou musculaires. Pour réduire l'inconfort, les gens changent de position afin de redistribuer les contraintes induites et il s'ensuit un réveil, ce qui réduit les heures de sommeil réparatrices (Park et coll., 2009).

Denninger et coll., 2011 suggère une hypothèse sur l'origine de l'inconfort. Selon eux, l'inconfort proviendrait des contraintes de cisaillement induites lorsque chaque partie du corps n'est pas directement supportée par la portion de matelas qui est sous celle-ci. En considérant cette hypothèse valide, une des solutions viables serait que tous les segments

du corps soient supportés par une portion de matelas directement au-dessous d'eux, par une force équivalente au poids du segment corporel. Ainsi, lorsque cette hypothèse ne serait pas respectée, il y aurait apparition de contraintes de cisaillement intervertébrales dans les régions lombaires.

La conception d'un matelas se fait souvent par essais-erreurs afin d'assurer un confort qualitatif optimal au client. Or, il est fort probable que le confort dépende de la position des points de pression qui sont eux-mêmes fonction de la distribution de masse et de volume de chaque personne. Outre la distribution de pression, la littérature actuelle suggère de bien contrôler la stabilité du matelas afin d'empêcher les mouvements de roulis et de tangage de celui-ci qui pourrait faire basculer l'utilisateur hors du lit. Finalement, le bien-être sensoriel (confort auditif et thermique) doit être tenu en compte afin d'assurer une meilleure expérience client que les matelas standards dits passifs.

La personnalisation du matelas apparaît donc essentielle afin d'assurer un confort qualitatif et quantitatif.

1.2. Définition du projet

Ce projet de maîtrise s'insère dans une collaboration entre le laboratoire *MSD Création* de l'Université de Sherbrooke (UdeS) et l'entreprise manufacturière québécoise et distributrice de matelas, *Matelas René Inc* à Nicolet. La compétition commerciale s'étant intensifiée depuis quelques années dans le secteur des matelas, *Matelas René inc.* désire poursuivre le développement de nouvelles technologies de matelas qui lui permettront de se démarquer sur les marchés résidentiel et hospitalier.

Le but général du projet de Recherche et Développement collaboratif est de concevoir et fabriquer un prototype de matelas personnalisé, ajustable selon la physiologie (la distribution de masse et la longueur des membres) d'une personne dans le but de se démarquer sur les marchés résidentiels.

Plusieurs concepts de base ont précédemment été explorés par *Matelas René inc.* pour développer une technologie qui réponde à ce but. Le concept le plus prometteur est un matelas qui consiste en une série d'environ 15 lattes transverses à suspensions unidirectionnelles individuelles et ajustables (Figure 1-1).

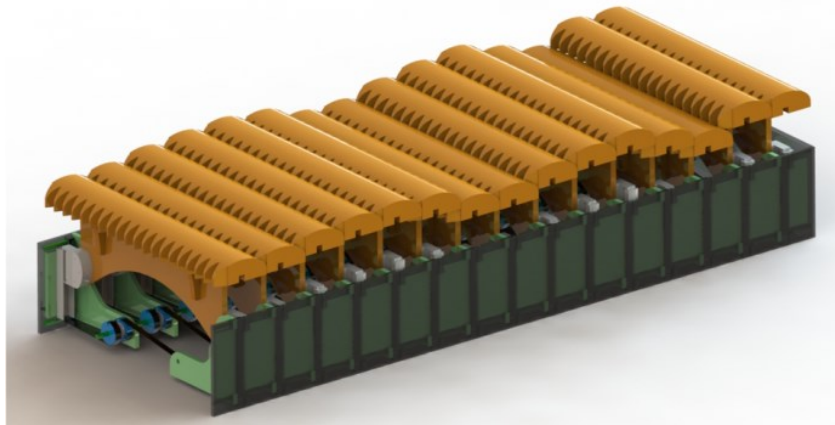


Figure 1-1 : Concept préliminaire à 15 lattes transverses. Ref : Matelas crée par François Martel, 2015, professionnel de recherche, laboratoire MSD Création

Un premier prototype, ne faisant pas partie du travail de ce mémoire, a montré son potentiel technologique et a permis de cibler plusieurs difficultés à surmonter pour une seconde génération. Les principales difficultés sont : la fabrication, l'assemblage, la maintenance, le bruit, le frottement, la mise en production, et l'ajustement de raideur. Celles-ci devront être réglés dans une version postérieure.

Avant de présenter les objectifs du présent mémoire sur la conception de cette seconde génération, le modèle d'un corps humain et une technique pour trouver le profil optimal sont respectivement présentés.

1.2.1 Modèle d'un corps humain

Il est possible de modéliser un être humain comme étant composé d'un ensemble de segments corporels allant de la tête aux pieds, reliés les uns aux autres par des articulations. Schématiquement, la répartition de ces segments sur une surface de confort peut se modéliser à l'aide de systèmes masse-ressort. Les segments du corps sont remplacés par des masses et l'interaction entre les segments et son environnement se fait par des ressorts de raideur appropriée (Figure 1-2).

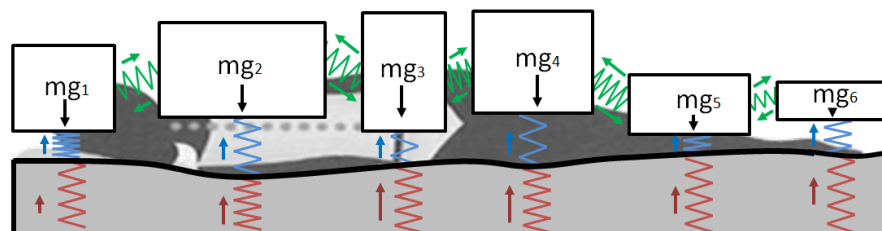


Figure 1-2 : Modélisation d'un corps humain à l'aide d'un système de masses-ressorts.

On suppose que le matelas possède une raideur uniforme (ressorts inférieurs en rouges), les tissus du corps en contact possèdent une certaine raideur qui peut être variable (ressorts intermédiaires en bleus) et chaque segment est attaché à son voisin avec une certaine

raideur intersegmentaire (ressorts supérieurs inclinés en verts). Les raideurs intersegmentaires peuvent aussi être représentés comme des pivots à rigidité infinie. Afin d'obtenir un confort optimal en respectant la distribution de masse de la personne, Denninger et coll. (2011), ancien membre du laboratoire *MSD Création* suggère donc que les forces intra-articulaires soient nulles pour empêcher le cisaillement intervertébral. Les forces intra-articulaires proviennent de l'action des segments corporels adjacents d'une masse donnée; ils peuvent la tirer ou vers le haut ou vers le bas. Voici donc le diagramme des corps libres (DCL) qui définit les forces appliquées sur le segment corporel 2 de la Figure 1-2.

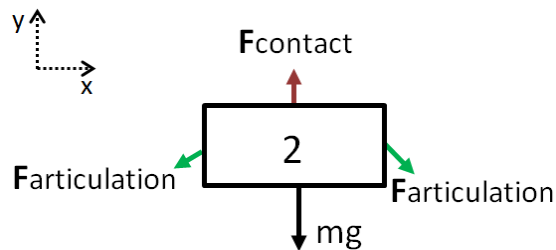


Figure 1-3 : DCL sur un segment du corps humain

La force résultante sur chaque segment du corps provient d'une sommation vectorielle de différentes forces illustrées à la Figure 1-3, soit : le poids du segment lui-même (**mg**), les forces intersegmentaires (**Farticulation**) et la force de contact du matelas sur le corps (**Fcontact**).

En effectuant la somme des forces sur un segment du corps, par exemple l'élément de la Figure 1-3, la force de contact avec le matelas doit être la même que le poids du segment au-dessus afin d'éviter l'apparition de forces intersegmentaires, principalement dans l'axe *y*. On peut alors s'imaginer se coucher sur le dos sur un plancher dur; le dos est arqué et les muscles dorsaux se contractent pour conserver un certain équilibre et les tissus conjonctifs reprennent les efforts sans qu'il n'y ait de contraction musculaire. Les muscles dorsaux reprennent des efforts pour garder le dos dans sa forme physiologique. Lorsque des forces intersegmentaires sont induites dans les régions lombaires, ces forces se transforment en contraintes de cisaillements intervertébrales, ce qui pourrait engendrer de la fatigue des muscles périphériques et une douleur dorsale causant éventuellement un réveil inopportun du dormeur et un changement de position. L'intérêt d'avoir un matelas qui suit complètement la courbure naturelle du corps sans espacement entre le plancher et le dos est évident, car plus aucune douleur ne survient.

Comme chaque être humain possède une physiologie différente, il est nécessaire de trouver le profil optimal et unique à chacun. Ainsi, dans le cadre du même projet de collaboration avec *Matelas René Inc.*, un outil instrumenté a été fabriqué en parallèle de cette présente maîtrise afin de déterminer ce profil idéal pour chacun à implanter : le lit instrumenté.

1.2.2 Outil instrumenté

Cet outil est muni de 40 lattes sous lesquelles se trouvent un actionneur et une cellule de charge (Figure 1-4). Les actionneurs permettent de positionner les lattes à une certaine position verticale et les cellules de charge lisent la force de réaction sur chacune des lattes. Le développement d'algorithmes a permis de faire converger les actionneurs vers différentes configurations verticales de lattes pour que les forces de réaction données par les cellules de charges soient égales à la force équivalente approximative du segment corporel supporté par la latte. À partir de cette recherche, le profil de chaque personne est déterminé pour différentes positions possibles de latte soit : sur le dos, le côté ou le ventre.

Le profil résultant, aussi appelé le *Profil statique personnalisé*, est constitué de forces et de positions uniques à chaque latte, respectivement indiquées par F_i et X_i sur la Figure 1-5. Les points d'opérations (F_i et X_i) sont alors convertis et redistribués sur les lattes du matelas ajustable en suspension tel que lancé par le client Matelas René. La rigidité de chaque latte du matelas se doit d'être adaptée à chaque position et à chaque personne afin de converger vers le même profil optimal trouvé par le lit instrumenté.

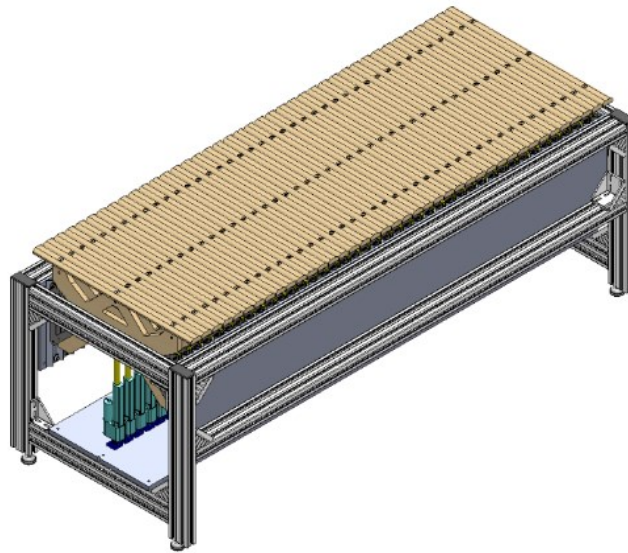


Figure 1-4 : Lit instrumenté. Réf : Projet de maîtrise à Tong Zhang, étudiant Université de Sherbrooke 2017

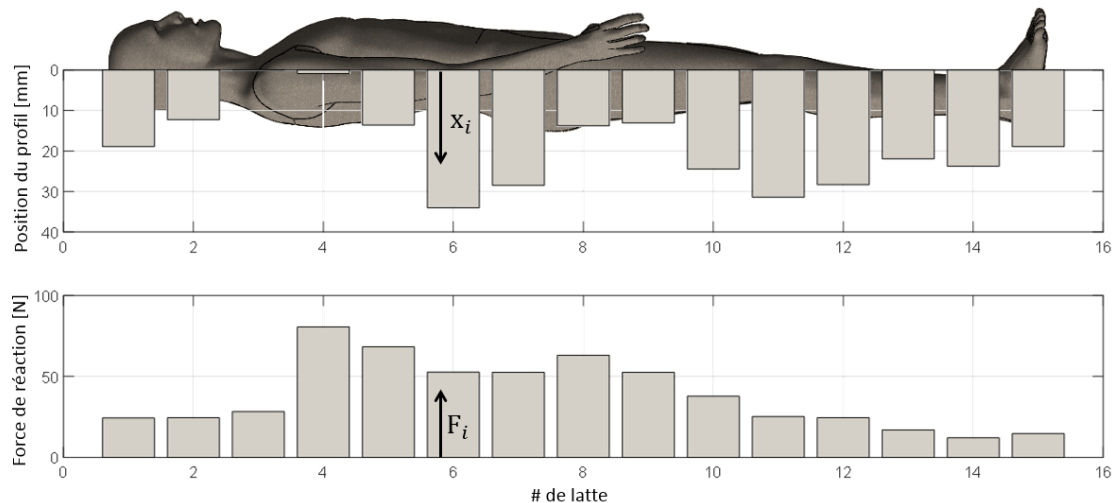


Figure 1-5 : Exemple d'un profil statique, composé d'une position et d'une force de réaction par segment, d'un individu d'une grandeur de 172 cm et de masse 58,9 kg couché sur le dos

1.3. Objectifs du projet de recherche

Suite à la conception de la première génération du lit ajustable et à la connaissance du *Profil statique personnalisé*, voici les objectifs de ce présent mémoire.

1.3.1 Objectif général

Concevoir et fabriquer un matelas à lattes multiples, à impédance verticale variable, permettant d'obtenir un profil personnalisé avec ajustement pour tout décubitus en temps réel.

1.3.2 Objectifs spécifiques

La conception du matelas s'est effectuée en répondant aux sous-objectifs suivants:

- Faire une étude des systèmes mécaniques existants à un degré de liberté (en translation verticale) et des systèmes de suspension automatisés;
- Concevoir le lit ajustable à l'aide d'un logiciel de conception 3D;
- Fabriquer un prototype du simulateur;
- Tester et caractériser le comportement du simulateur;

1.4 Contributions originales

Depuis des dizaines d'années, de nombreux chercheurs et fabricants s'intéressent à la raideur optimale des matelas afin de les rendre toujours plus confortables pour une personne couchée dans toutes les positions, pour les marchés résidentiels et hospitaliers. Ce projet de recherche a abordé la même question, mais en considérant le *Profil statique personnalisé* comme étant le confort optimal. Ainsi, en séparant un matelas en différentes

sections, chacune d'entre-elles devra avoir une rigidité spécifique afin de reproduire le *Profil statique personnalisé* d'un utilisateur. Cette approche, à notre connaissance, n'a pas encore été étudiée par le passé.

1.5 Plan du document

Le deuxième chapitre fait état de l'art des interactions humains-matelas et les couches de confort innovantes existantes sur le marché. Le cahier des charges a été construit en collaboration avec le client et est présenté au troisième chapitre. Ensuite, le quatrième chapitre présente les choix de conception détaillée des sous-systèmes du simulateur. Le cinquième chapitre contient la caractérisation du matelas (modélisation du système et tests expérimentaux) sous la forme d'un article soumis au Journal of Mechanical Design de l'ASME. Le sixième chapitre décrit les recommandations au client et les perspectives futures du projet. Enfin, le dernier chapitre présente les conclusions de ce mémoire.

CHAPITRE II

ÉTAT DE L'ART

L'objectif de cet état de l'art est de démontrer les interactions mécaniques et sensorielles importantes entre l'humain et le matelas, tout en faisant une revue des matelas innovants existants actuellement sur le marché. Ensuite, se basant sur l'objectif principal du projet deux stratégies de conception de matelas personnalisés seront abordées.

2.1. Interactions Humain-matelas

Les interactions avec le matelas peuvent essentiellement se faire de façon mécanique et sensorielle. Plusieurs approches sont fréquemment utilisées en science et en génie pour étudier les interactions mécaniques dont : la distribution de pression du corps humain et la stabilité du corps (López-Torres et coll., 2008). Les surfaces de confort ne servent pas seulement à garder le client confortable, mais ils doivent également garder l'utilisateur à l'aise sensoriellement (température et bruit) dans son environnement (S.Rithalia et L.Kenney, 2000). Ainsi, Lei et coll. (2009) ont étudié le confort avec une centaine de personnes en faisant varier des facteurs environnementaux tels que la qualité de l'air, la température, l'humidité, la lumière et le bruit. Dans le cas de ce présent projet de recherche, seuls le bruit et la température seront des facteurs de bien-être sensoriel qui pourraient être mesurés directement par le matelas dans le cadre d'une séance d'expérience client. Voici donc une description détaillée de l'interaction mécanique et sensorielle des matelas.

2.1.1. Interactions mécaniques

Il est possible de séparer l'interaction mécanique d'une personne sur un matelas en deux facettes : la distribution de pression et la stabilité du corps en tout temps.

2.1.1.1. *Distribution de pression*

La plupart des matelas sur le marché sont à raideur fixe, offrant des propriétés de raideur constante, quel que soit le point de contact avec le matelas. Ici, la raideur réfère aux matelas à ressorts de compression qui détiennent une raideur définie, une propriété intrinsèque au composant mécanique. Ces matelas sont fabriqués en couches de matériaux variés (mousses de polyuréthane, de latex, ou de silicone, gel, laine, cheveux d'animaux, fibres synthétiques, etc.) ou de composantes flexibles à grande déformation pour la couche de support (ressorts ensachés, bandes de tissus ou de métal, lamelles flexibles, etc.). Un matelas d'une grande raideur induit généralement des points de pressions aux hanches et aux épaules, ce qui peut créer une flexion latérale de la colonne vertébrale (Figure 2-1 a)). Lorsque le matelas est d'une plus faible raideur, les hanches et les épaules seront enfoncées, créant une flexion latérale et induisant des points de pression à ces endroits (Normand et

coll., 2005 - (Figure 2-1 b)). Notez bien qu'il manque une partie du matelas figurant sur la Figure 2-1 b. à des fins de compréhension seulement.

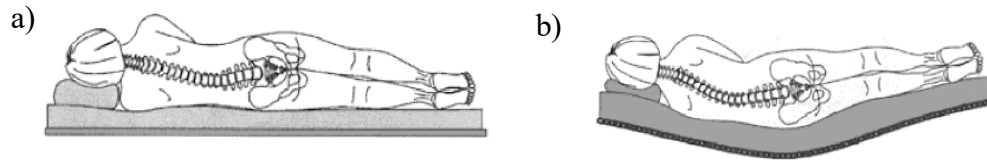


Figure 2-1 : Géométrie de la colonne vertébrale en position latérale en fonction de la raideur du matelas, a) Matelas de raideur élevée, b) Matelas de raideur faible (Haex, 2004)

Selon Haex, Sloten, & Audekercke (1996), un matelas de confort optimal doit supporter le corps humain pour que la colonne vertébrale soit dans sa position neutre, c'est-à-dire la même qu'en position debout, sans lordose ni scoliose (Figure 2-2).

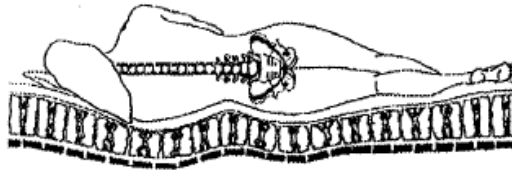


Figure 2-2 : Colonne vertébrale en position neutre (Haex, Sloten, & Audekercke, 1996)

Ces auteurs mentionnent également que les hanches doivent être supportées par une grande force afin de prévenir le pelvis de basculer transversalement vers l'avant et à l'inverse, que les épaules doivent être supportées avec une petite force afin de prévenir une scoliose dorsale.

En comparant cet auteur avec Haex (2004), on observe que les supports rigides doivent être positionnés aux mêmes endroits (c.-à-d. les hanches et les épaules) afin de diminuer les points de pression, mais aussi afin d'obtenir une colonne vertébrale droite, à sa position neutre.

En installant un ballon gonflé sous le bas du dos d'une personne couchée en position dorsale, Normand et coll. (2005) prouvent expérimentalement qu'une augmentation de la pression juste au-dessus des hanches ajuste le corps pour avoir la colonne vertébrale en position neutre, fait diminuer la pression au niveau du pelvis et permet de limiter les forces de compression et de cisaillement qui agissent dans les régions lombaires. La Figure 2-3 illustre le corps squelettique, afin de bien montrer la forme de la colonne vertébrale, lorsque le ballon est dégonflé versus gonflé. Cette technique favorise un meilleur soutien lombaire étant donné une répartition plus homogène de la pression. Cependant, aucune mention n'est faite pour une personne couchée sur le côté.

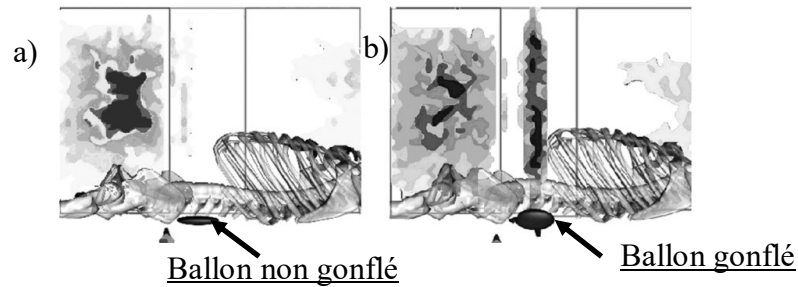


Figure 2-3 : a) Insertion d'un ballon non gonflé sous une personne b) Insertion d'un ballon gonflé sous une personne pour répartir la pression (Normand et coll., 2005)

Aoi et coll. (2015), ont évalué le confort des matelas en comparant cinq matelas de raideurs différentes. Ces auteurs observent et confirment que la posture en position spinale est différente de la position latérale, en plus d'être différente pour des matelas différents (Figure 2-4).

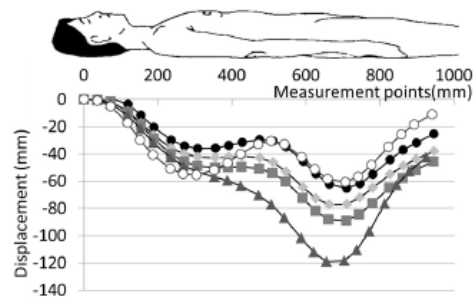


Figure 2-4 : Position du corps pour cinq matelas de différentes raideurs (Aoi et coll. 2015)

En position dorsale, les hanches et les épaules semblent s'enfoncer beaucoup plus que les autres régions du corps. Le profil physiologique est toujours différent pour les cinq matelas de raideur différente sans toutefois pouvoir les ajuster pour chaque individu. Or, cette constatation montre bien l'intérêt d'un matelas ajusté pour chaque personne afin de supprimer tous les points de pression et les forces de cisaillement intervertébrales.

Bader et Engdal (2000) a étudié le cycle de sommeil de neuf hommes ayant dormi sur des matelas de raideur élevée ou de faible raideur. Les résultats ne montrent que les participants n'avaient aucune préférence pour les matelas, qu'ils soient à grande ou faible rigidité même si l'étude révèle des différences physiologiques importantes entre chaque individu.

Enfin, les auteurs préalablement cités croient que la personnalisation d'un matelas est nécessaire afin d'atteindre un confort optimal pour tous. Finalement, puisque chaque personne possède une physiologie et une distribution de masse différentes, des zones de raideurs indépendantes seraient une bonne avenue possible à la personnalisation.

2.1.1.2 Stabilité du corps

La stabilité du corps sur un matelas est définie comme étant la facilité de se mouvoir (de changer de position) en ressentant un soutien constant. Lorsque le corps est en mouvement

de rotation autour de son axe longitudinal (roulis) ou de son axe transversal (tangage), l'instabilité apparaît et le confort est soudainement altéré (Figure 2-5).

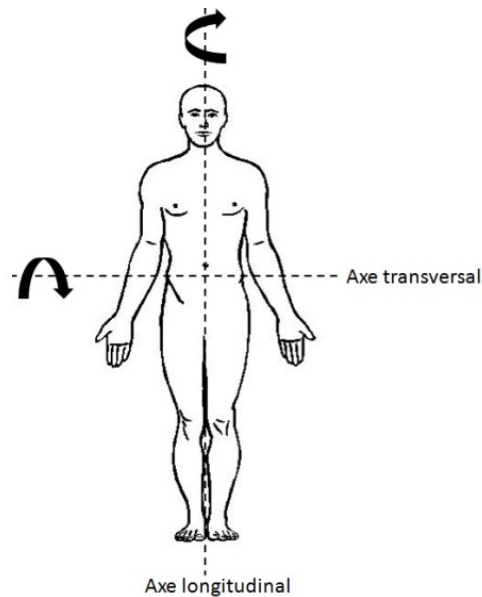


Figure 2-5 : Illustration d'un corps humain et de ses axes de rotation principaux en position couchée

Shen et coll. (2012) confirme expérimentalement qu'un matelas avec une mauvaise stabilité augmente le nombre de mouvements du corps pendant le sommeil, ce qui augmente la durée de l'état de réveil.

Plusieurs brevets existent afin de corriger les problèmes d'instabilité des matelas à ressorts conventionnels. En effet, les effets de bord d'une construction de ressorts à rigidité uniforme provoquent de l'instabilité pour des ressorts de compression seuls, et ceux-ci peuvent flamber. Lorsque la personne se dirige vers une extrémité du lit, une pente se crée vers l'extérieur ce qui permet à la personne de rouler jusqu'à tomber du matelas. En voici quelques exemples :

Le brevet de H. Beckman, (1966) suggère de fabriquer les ressorts extérieurs avec une rigidité contrôlée et de les attacher ensemble afin d'empêcher l'affaissement (Figure 2-6).

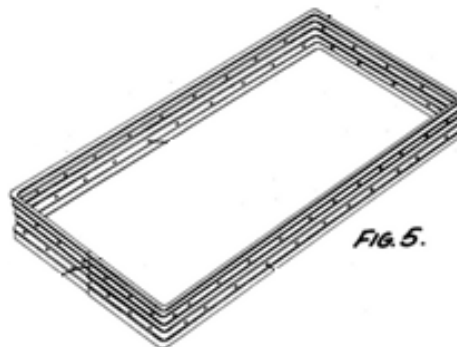


Figure 2-6 : Figure présente dans le brevet de H. Beckman, 1966

Un autre brevet (Ikeda, 1981) propose d'éliminer complètement le débalancement du corps en ajoutant des supports externes d'une géométrie définie de plus grande raideur que la raideur au centre du matelas (Figure 2-7).

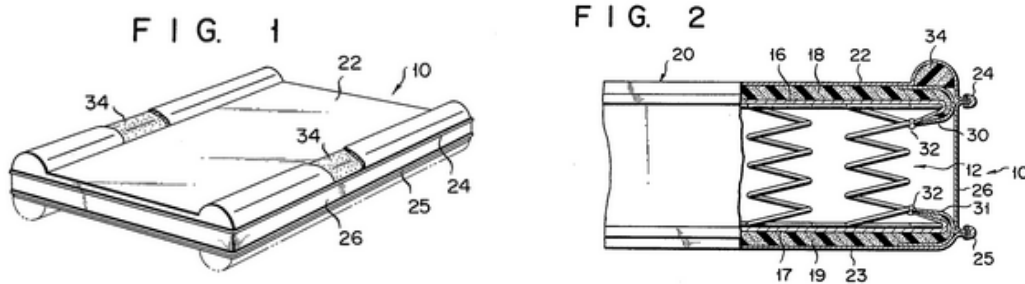


Figure 2-7 : Figure 1 et 2 du brevet (Ikeda, 1981)

Le brevet de Sanderson Kluft (2001) présente une méthode d'anti-roulement économique, à fabrication facile par l'ajout de planches de mousses rigides placées directement sur le périmètre de l'unité de ressorts afin de renforcer le pourtour du matelas (Item 22 et 24 de la Figure 2-8).

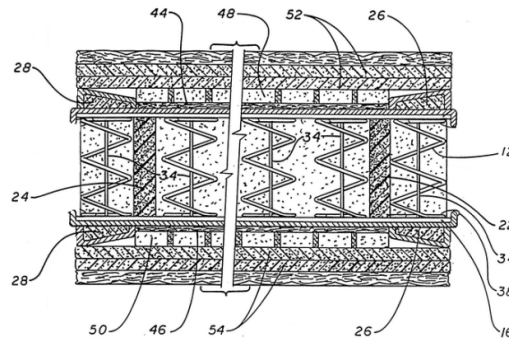


Figure 2-8 : Figure 1 du brevet (Sanderson Kluft, 2001)

Récemment, López-Torres et coll. (2008) ont prouvé expérimentalement qu'un matelas plus ferme augmente la facilité de se mouvoir, de se tourner dans le lit. Ce même auteur mentionne qu'il existe une relation selon laquelle les personnes avec un embonpoint sont plus sensibles à la fermeté du matelas que les personnes plus minces ainsi elles se sentent plus souvent en déséquilibre sur un matelas. Dans le langage commun des matelas, la fermeté désigne la sensation de rigidité, tandis que la rigidité est, dans le langage technique, la relation qui existe entre la force et le déplacement d'un système.

Ainsi, puisque le confort dépend de la fermeté du matelas qui elle dépend de la rigidité du matelas, les personnes avec un surplus de poids auront besoin d'une rigidité différente pour se sentir aussi confortables qu'une personne sans problème de poids. La personnalisation du matelas semble donc, encore une fois, nécessaire afin d'assurer la stabilité des clients en tout temps.

2.1.2. Interactions sensorielles

Le bruit crée par le retournement des individus sur le matelas et la chaleur sont deux des facteurs sensoriels importants qui peuvent le plus influencer le sommeil.

Selon Muzet (2007), le bruit est un élément de distraction sensoriel important. La sensibilité au bruit d'une personne endormie dépend de plusieurs facteurs : du type de bruit (intermittent, continu ou impulsif), de l'intensité, la fréquence et surtout la différence entre le bruit ambiant et l'amplitude maximale du stimulus entendu. Selon l'Organisation mondiale de la santé (1996), la perturbation d'un sommeil normal peut être observée lorsque le seuil de bruit atteint entre 45 dB et 55 dB.

Du côté de la chaleur, Lee et Park (2006) s'intéressent aux effets d'un matelas qui supporte la colonne vertébrale dans sa courbe naturelle, en position debout, sur la qualité du sommeil. Ils observent que la température du corps humain est plus grande lorsque le corps est couché sur ce type de matelas (qu'ils qualifient de « confortables ») que sur un matelas qui ne comporte pas cette particularité (qu'ils qualifient comme « inconfortables ») (Figure 2-9).

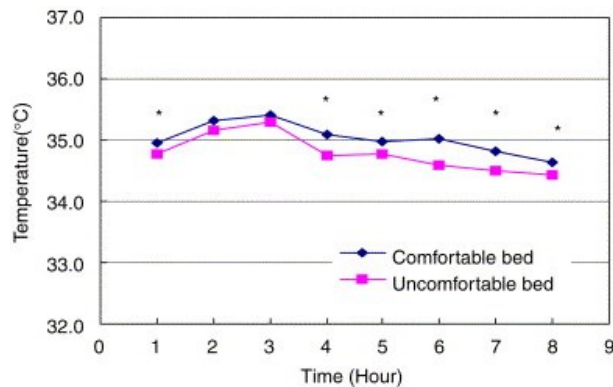


Figure 2-9 : Température du corps en fonction d'un lit confortable et inconfortable (Lee and Park, 2006)

Ces auteurs soutiennent qu'une augmentation des mouvements du corps pendant le sommeil expose le corps à plus d'aires de surface globale du matelas ce qui fait diminuer la température du corps. Ainsi, un matelas qu'ils qualifient de « moins confortable » aura plus tendance à stimuler des mouvements ce qui occasionne des réveils plus fréquents, un sommeil moins profond et moins long. De plus, les résultats de l'article montrent un meilleur pourcentage de sommeil profond, un meilleur pourcentage de sommeil efficace et une opinion subjective plus favorable pour le lit « confortable ».

Liu et coll. (2014) observent expérimentalement les conditions thermiques optimales. La température moyenne du matelas devrait être entre 30.2 -31° et la température moyenne du corps de 34.5° pour les hommes et 34.9° pour les femmes. Ces données se rapprochent considérablement des données obtenues par Lee and Park (2006).

Les études thermiques mentionnées précédemment impliquent des différences de température de moins de $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui est probablement non significatif pour influencer le sommeil. L'interaction sensorielle thermique sera donc négligée dans le cadre de cette recherche et ainsi seule la distraction sensorielle auditive sera considérée.

2.2. Matelas innovants

Cette section présente quelques exemples de matelas avec un support innovant. Les trois critères de personnalisation (distribution de pression, stabilité du lit, et bien-être sensoriel) seront évalués et les avantages et inconvénients de chaque matelas seront énoncés.

2.2.1. Matelas à zonage

À la lueur de la première section de l'état de l'art, il est conseillé d'adapter la rigidité du matelas selon la distribution de masse des gens. En effet, aucune conclusion n'a été faite en ce qui a trait à la rigidité générale qu'un matelas devrait avoir pour assurer le confort optimal d'une personne (matelas à grande ou à faible raideur). Zhu et coll. (2011) propose plutôt un matelas avec des zones de raideur différentes. En analysant les points de pression à la tête, aux épaules, à la zone thoracique, aux fesses et aux jambes voici la discrétisation qu'ils proposent (Figure 2-10).

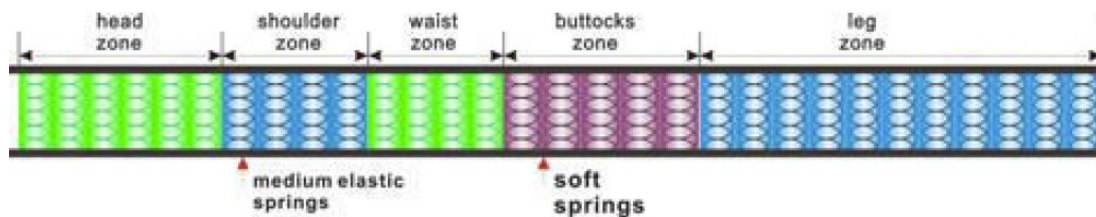


Figure 2-10 : Discrétisation d'un matelas en zones de raideur différentes Zhu et coll. (2011).

On remarque une raideur plus faible aux fesses, une raideur moyenne aux épaules et aux jambes et une raideur plus grande à la tête et au torse. Cette configuration permet, selon eux, un meilleur soutien de la colonne vertébrale dans sa position neutre.

Ce type de matelas est vendu à travers le web sur différentes plateformes tel qu'Amazon, eBay ou Alibaba. La Figure 2-11 présente un modèle basé sur ce principe, vendu sur Amazon par la compagnie *Evergreen Comfort Industries* (Meerut, Uttar Pradesh). Les sections sont formées d'alvéoles de géométrie différentes à travers le matelas fait à 100% de latex ce qui leur procure une raideur différente.



Figure 2-11 : Matelas à zones de raideur différentes (version 1) par *Evergreen Comfort Industrie*

Cette même compagnie vend directement sur son site web un matelas conçu avec un grand nombre de zones de dureté différentes en faisant varier l'épaisseur de ces couches : mousse mémoire, mousse en polyuréthane de haute dureté et de faible dureté (Figure 2-12).

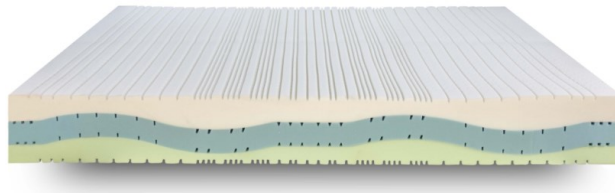


Figure 2-12 : Matelas à zones de raideurs différentes (version 2) par *Evergreen Comfort Industries*

L'objectif de l'entreprise avec la conception de ces deux produits est de supporter convenablement chaque partie du corps afin de relaxer tous les muscles du corps et les points de tension accumulés pendant la journée. Bien que le deuxième produit, vendu sur leur site web, comporte un meilleur soutien global sans discrétisation abrupte, les deux modèles ne permettent pas une personnalisation optimale. Chaque personne possède une physiologie et une distribution de masse différente, ce qui lui impose une distribution de raideur particulière à respecter pour un confort optimal. La stabilité du lit ne semble pas être respectée par l'inexistence de bord d'arrêt au pourtour du matelas. Cependant, le bien-être sensoriel semble être respecté.

2.2.2. Entreprise Dorsoo

L'entreprise Dorsoo (Hoorn, Dorsoo BE), a développé un lit avec 26 pistons hydrauliques connectés entre eux. Ceux-ci permettent de faire descendre 13 lattes indépendantes qui s'ajustent automatiquement au mouvement du corps, par conservation de volume hydraulique (Figure 2-13). Autrement dit, la masse qui s'appuie sur la section centrale redistribuera le fluide dans les autres sections du lit afin d'uniformiser la distribution de pression. Lorsqu'une latte descend, d'autres montent et vice-versa avec le déplacement du fluide.

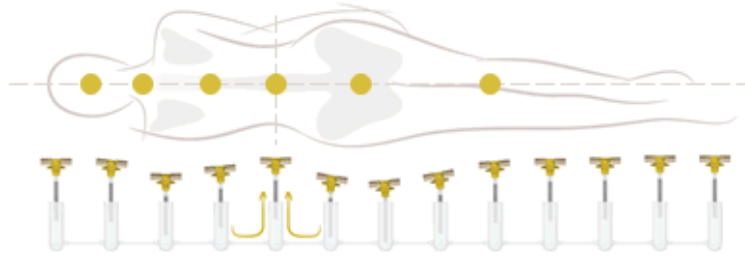


Figure 2-13 : Matelas de l'entreprise Dorsoo (Hoorn, Dorsoo BE)

L'inconvénient de ce système réside dans le fait que celui-ci est conçu de la même manière pour toutes les clientes et tous les clients, car le volume de fluide est le même pour tous; la résistance au fluide est donc la même partout ce qui induit un support inadéquat, car il y a existence de cisaillements à travers le corps. En effet, chaque segment du corps a une masse différente ce qui devrait induire des rigidités différentes. Selon le site web de l'entreprise, les lattes semblent rester parallèles lorsqu'il y a déplacement du corps vers le bas. En effet, on remarque que la personne peut se tourner sans se sentir débalancée d'un côté par roulis ou tangage; la stabilité est donc conservée. En revanche, aucune mention n'est faite sur le bien-être des sens tel que le bruit, possiblement créé par le mouvement du mécanisme hydraulique.

2.2.3. Entreprise Westend Bed compagny

Comme l'entreprise *Dorsoo* (Ninove, Belgique), *Westend Bed compagny* (Londres, Angleterre) a réalisé un lit appelé le *Nottinblu*, s'adaptant à la distribution de masse et de volume de la personne par conservation de longueur de corde (Figure 2-14). Des ressorts sont installés de chaque côté des lattes et une corde passe sous chacune d'elle de façon à consommer une certaine longueur de corde sur chaque latte. L'objectif formellement défini par l'entreprise est de s'ajuster automatiquement au poids, à la géométrie et au mouvement du corps.



Figure 2-14 : Type *Nottinblu* de l'entreprise *Westend Bed Compagny*

Ce faisant, ce concept n'assure pas un confort optimal puisque le déplacement total des lattes dépend d'une longueur de corde fixe insérée dans le système, qui lui, doit être personnel à chacun pour assurer un confort optimal. En effet, comme mentionné par Lopez-Torres et coll. (2008), les personnes avec un surplus de poids auront probablement besoin d'un profil plus sinueux et donc nécessiterait une longueur de corde plus grande pour se

sentir confortable qu'une personne sans problème de poids. La Figure 2-14 suggère également que les câbles déplacent la base des ressorts afin de modifier la force de réaction induite au segment corporel, ce qui est nécessaire à l'obtention d'un matelas ajustable. Par contre, comme tous les gens n'ont pas la même distribution de masse et donc le profil devrait varier en conséquence à des endroits spécifiques. Par exemple, les femmes sont plus lourdes du bas du corps (des hanches) que des épaules et inversement pour les hommes ce qui induirait un confort non-ajusté pour tous.

De plus, on remarque sur la Figure 2-15 que les sections sont en flexion lorsqu'un corps s'appuie dessus. Ainsi, le déplacement des parties du corps est complètement altéré par cette déformation et ne suit plus une courbe qui assure une distribution de pression adéquate. La stabilité peut avoir été impactée dû à une plus grande difficulté de se mouvoir lorsque le corps se sent enfoncé dans un bassin arrondi.



Figure 2-15 : Flexion des sections de la marque *Nottinblu*

Finalement, aucune information n'est fournie sur la position du corps, la colonne vertébrale en position neutre ou le bien-être sensoriel tel que le bruit et la conservation de la chaleur du corps. La stratégie de longueur de corde ne semble pas adaptée pour avoir un confort maximal et personnalisé.

2.2.4. Technologie NUBA™ de Matelas René

Le matelas NUBA™ a été conçu à partir de l'article de Denninger et coll. (2011) qui démontre l'intérêt de cubes de mousse évidés afin d'atteindre un confort. Par contre, ce concept comporte de nombreux désavantages importants dans la personnalisation, soit l'utilisation du même matelas pour plusieurs personnes de physiologies différentes. Les outils de production de cette technologie ne permettent pas pour l'instant d'ajuster la forme des cavités ovales afin de faire changer la rigidité du matelas pour d'autres individus. Aussi, la compression du matelas ne pourrait jamais atteindre une compression de plus de 2 po, ce qui pourrait être insuffisant pour certaines personnes, ayant notamment une plus grande masse. Néanmoins, ce matelas comporte des bords d'arrêts en mousse rigide sur les quatre côtés du matelas ce qui offre une meilleure stabilité lorsqu'on veut s'asseoir sur un côté du matelas ou bien se tourner dans le lit sans se sentir déporté hors du matelas. Cette technologie sera plus amplement abordée dans la section 2.3.

2.2.5. Brevet « Mattress structure É.-U. 6996865B2 »

Jeffrey M. Sabin, l'auteur du brevet (Sabin, 2006) a développé un matelas comprenant une multitude de ressorts indépendants, montés dans des structures tubulaires fixées sur une plaque de support inférieure (Figure 2-16).

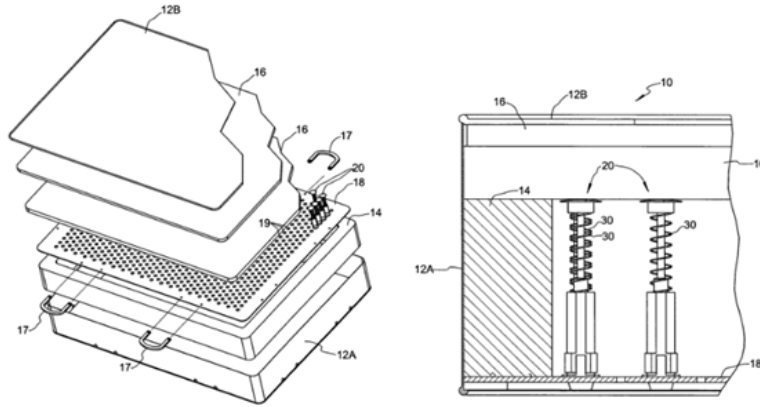


Figure 2-16 : Figure 1 du brevet Sabin, (2006) : un système à interdépendance de ressorts

Des entretoises de longueur définies sont spécialement choisies afin de configurer la précharge des ressorts. L'ajustement, l'interdépendance et le grand nombre de ressorts permettent de contrôler le facteur de confort de distribution de pression. Les tubes permettent également d'empêcher le flambement des ressorts afin de respecter le facteur de confort et de stabilité du matelas sans toutefois ajouter un effet de bord sur le pourtour du matelas. Ce lit, innovant, permet certainement un ajustement personnalisé prenant en considération la distribution de masse d'une personne, sa stabilité et son bien-être. Cependant, le budget accordé à la fabrication de ce lit est certainement très élevé. Cela obligerait donc de vendre le matelas à un prix élevée pour une grande majorité de la population.

Plusieurs dizaines, sinon centaines de matelas différents existent sur le marché, et il serait difficile de pouvoir les répertorier tous. L'idée de cette recension des écrits était de cerner si des études émettaient des conclusions claires sur les paramètres qui assurent le confort, et si certaines technologies distinctives pouvaient servir de point de départ à la conception d'un simulateur de matelas personnalisé. La recension exploratoire qui a été faite démontre pour l'instant, qu'aucun matelas ne semble donner un soutien adéquat pour toute une variété de physionomies différentes, tout en gardant la personne dans une position de stabilité, sans en affecter son bien-être sensoriel, et à un prix qui serait abordable pour une version commerciale.

2.3. Stratégies de conception d'un matelas personnalisé

Dans la littérature, Denninger et coll. (2011) et S.Rithalia et L.Kenney (2000) suggèrent l'hypothèse du *Profil statique personnalisé*. En l'absence de forces dynamiques, et donc sans mouvement de la personne, la force générée par le matelas correspond au poids du segment du corps qu'il supporte. C'est à partir de cette hypothèse que sera abordée la conception du matelas ajustable personnalisé. Il paraît donc nécessaire de fournir une raideur individuelle à chaque latte qui permettra d'atteindre toutes forces et positions possibles du profil d'un humain. Dans cette section, la position dorsale est prise en exemple.

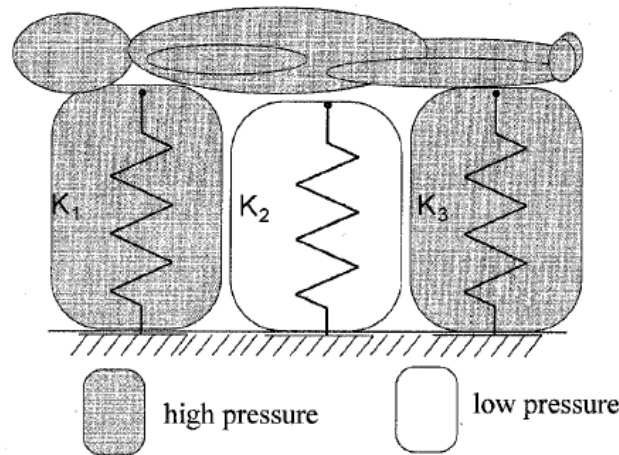


Figure 2-17 : Modèle simplifié de la mécanique d'une surface de confort (S.Rithalia et L.Kenney, 2000)

Deux approches sont alors envisageables pour réaliser un tel matelas afin d'obtenir le profil idéal caractérisée par une force F_i et un déplacement x_i par latte. La première approche est donc de faire varier directement les raideurs K_i des segments du matelas. La Figure 2-17 présente un exemple de matelas constitué de trois sections qui permettra d'atteindre avec une force F_i à une position X_i avec les dits ressorts K_i .

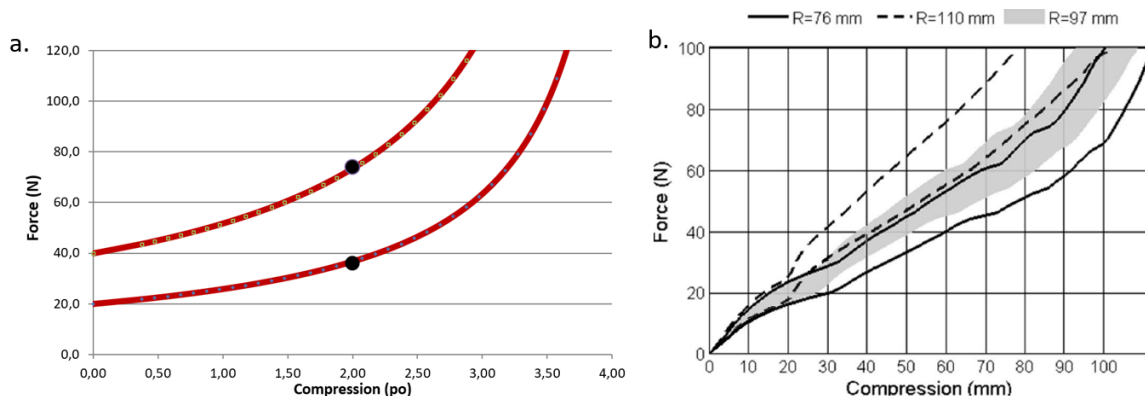


Figure 2-18 : Exemple de surface de confort qui change de raideur pour atteindre n'importe quel point de la courbe force-déplacement. a. Exemple issue de la physiologie humaine. b. Approche utilisée par Denninger et coll., (2011) pour la conception de la technologie NUBA™

Prenons par exemple la Figure 2-18 b, le matelas est divisé en cubes de mousse évidés de 4 po et chacun d'entre eux peut être ajusté en modifiant les dimensions de la cavité ellipsoïdale afin de changer la rigidité de la mousse autour d'un point d'opération voulu (Figure 2-19).

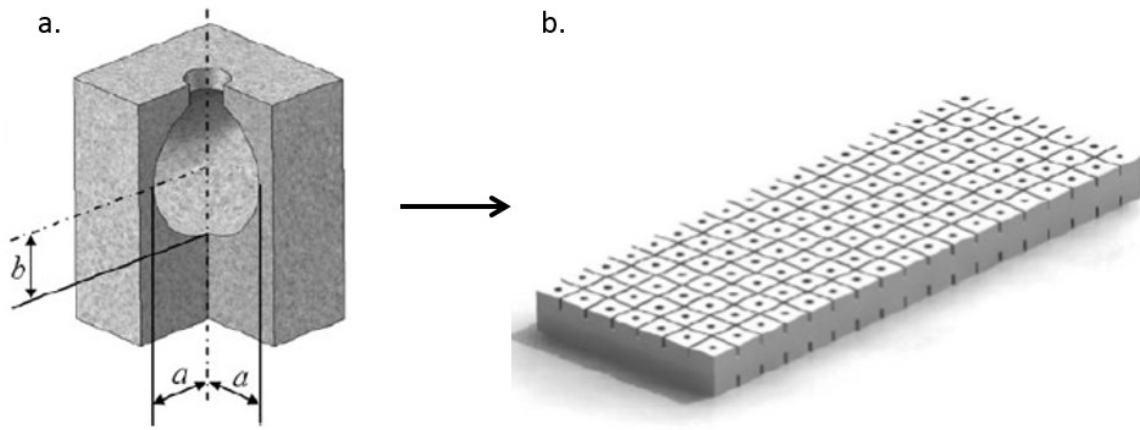


Figure 2-19 : Technologie à cubes évidés NUBA™, *Matelas René inc.* (Denninger et coll., 2011)

a. géométrie d'un seul cube évidé, b. vue globale du matelas

La seconde approche est d'utiliser un élément compliant, par exemple un ressort, et de lui induire différentes pré-compressions (δx) à sa base afin d'atteindre tous les points du graphique F-x (Figure 2-20).

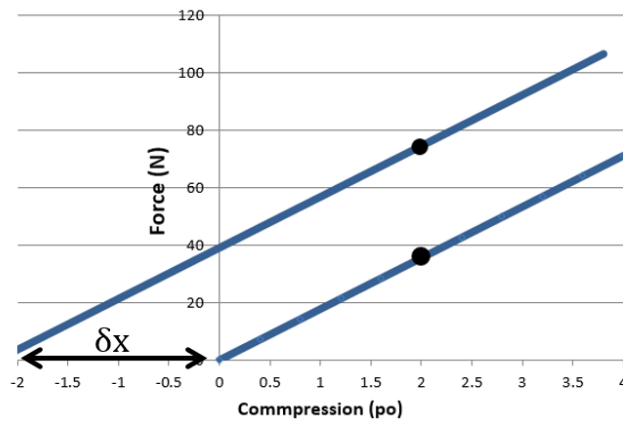


Figure 2-20 : Exemple de surface de confort avec ressort pré-comprimé, permettant d'atteindre n'importe quel point de la courbe force-déplacement

Comme on peut le constater sur la Figure 2-20, les mêmes couples de points d'opération $x_i = 2$ po, $F_i = 36$ N et $x_i = 2$ po, $F_i = 74$ N sont atteignables.

Ces deux approches sont comparées dans le chapitre quatre de cette étude afin de répondre aux objectifs de cette maîtrise.

Le prochain chapitre présente les besoins, les fonctions et les spécifications du prochain matelas, basés sur un état de l'art des matelas actuels et des demandes du client.

CHAPITRE III

CRITÈRES DE CONCEPTION

3.1 Cahier des charges

Ce chapitre regroupe tous les besoins du client (Matelas René), les fonctions et les spécifications qui en découlent pour un matelas personnalisé.

3.1.1. Liste des besoins

Table 3-1 : Liste des besoins du matelas ajustable

| No. | Besoins |
|------|--|
| B.1 | Respect des dimensions d'un lit simple |
| B.2 | Contient 15 lattes pour un lit simple |
| B.3 | Suspension indépendance de chaque latte |
| B.4 | Doit pouvoir guider les lattes |
| B.5 | Interchangeabilité possible des lattes et de la suspension |
| B.6 | Retour de toutes les lattes vers une hauteur commune lorsqu'elles sont sollicitées |
| B.7 | Conserve les lattes horizontales en tout temps lors de leur translation |
| B.8 | Les lattes doivent se déplacer sur 4 po |
| B.9 | Le mouvement des lattes doit être arrêté après 4 po |
| B.10 | Gérer les forces d'utilisation normales dans toutes les directions sans briser |
| B.11 | Permettre un ajustement de raideur de chaque section |
| B.12 | Permettre le retour des sections à la position initiale plane (lorsque non chargées) |
| B.13 | Rendre le mécanisme quasi silencieux |
| B.14 | Permettre une conception avec le moins de pièces possible |
| B.15 | Permettre une installation rapide et efficace |
| B.16 | Doit se transporter en modules indépendants |
| B.17 | Éviter de briser lors du transport |
| B.18 | Contrôle de chaque latte indépendante du système (automatisation) |
| B.19 | Possibilité de désactiver la suspension lors de la pratique d'autres activités |
| B.20 | Utiliser des méthodes de fabrication accessibles |
| B.21 | Respect d'un style aérien (mécanisme au centre du matelas) |
| B.22 | Stabilité du lit en tout temps |
| B.23 | Limite la hauteur du lit à 20 po |
| B.24 | Coût de fabrication en bas de 5000\$ |
| B.25 | Recyclable |
| B.26 | Belle apparence (Esthétisme) |
| B.27 | Aspect nouveau (futuriste) |
| B.28 | Sécuritaire pour l'utilisateur |

3.1.2. Analyse fonctionnelle

Les fonctions ont été formulées et placées dans l'arbre fonctionnel suivant.

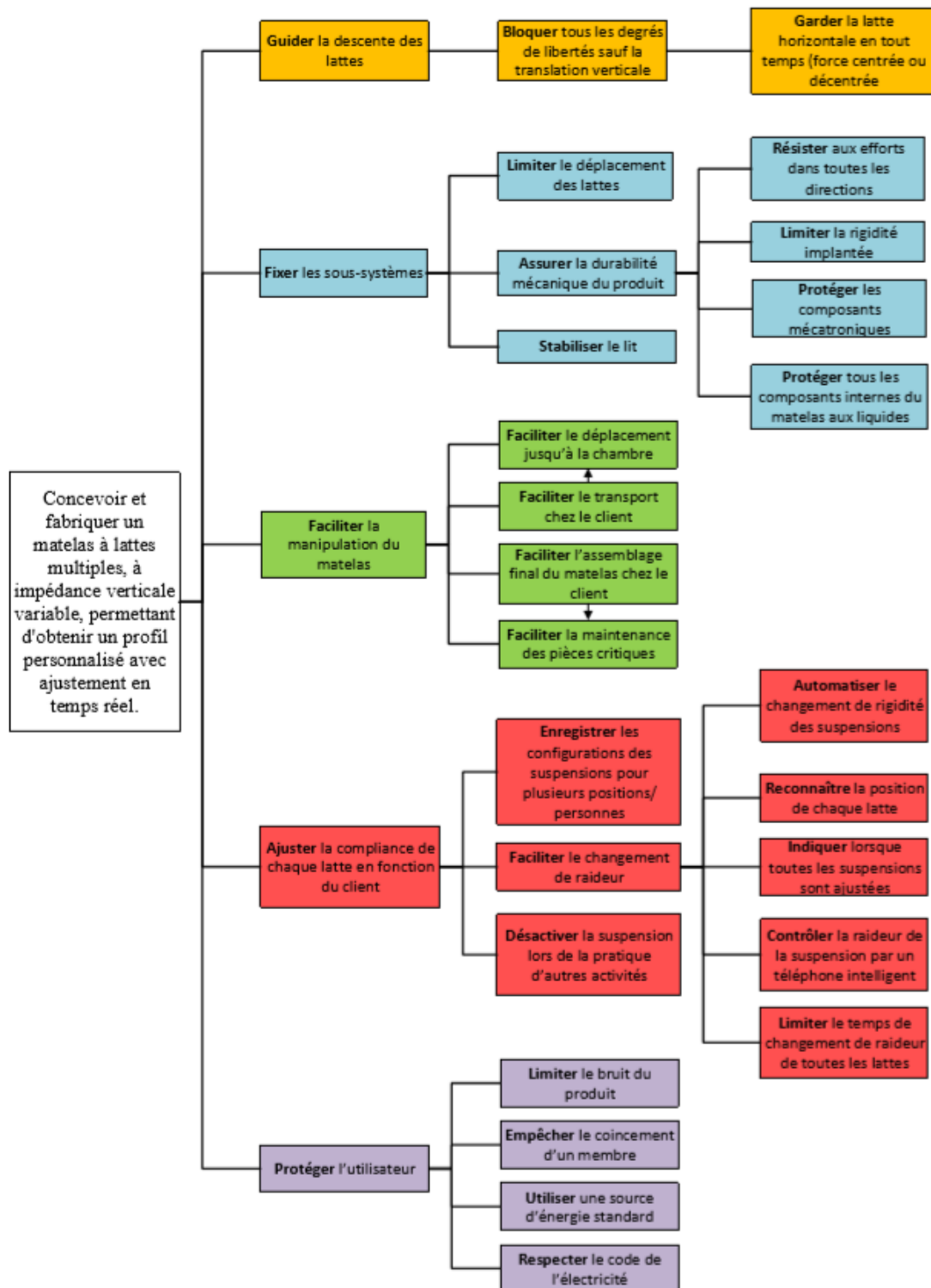


Figure 3-1 : Arbre fonctionnel du matelas

Voici les notes à la conception basées sur les demandes du client.

1. Respecter les standards des lits simples de haute qualité
2. Respecter un style aérien (utiliser un mécanisme qui guide les lattes au centre du matelas)
3. Permettre l'interchangeabilité des lattes
4. Limiter le coût de fabrication du prototype à 5 000\$ pour un lit simple;
5. Réduire le nombre de pièces total pour un assemblage plus rapide;

Pour donner suite à l'établissement de l'analyse fonctionnelle, le produit a été divisé en différents systèmes afin de faciliter son design.

1. Système de guidage
2. Système de suspension
3. Système structure
4. Système mécatronique.

Le système de guidage et de contact répondra à la fonction de base : guider la descente des lattes. Le système de suspension et de mécatronique répondra à la fonction de base : ajuster la compliance de chaque latte en fonction du client. Le système de structure répondra aux fonctions principales : fixer les sous-systèmes et faciliter la manipulation du matelas. Enfin, toutes les fonctions dans la fonction principale Protéger l'utilisateur seront tenues en compte à travers tous les systèmes.

3.1.3. Spécifications

Tableau 3-1 : Cahier des charges

| Systèmes | # | Fonctions | Spécifications | Définition | Niveau | Flexibilité | Source |
|------------|----|---|---|---|---------------------------|-------------|---------------------------------|
| Guidage | 1 | Guider la descente de la latte | Force de frottement | Force minimale pour qu'il y ait mouvement de la latte, sans suspension | 5 N | Maximal | Entrevue client |
| | 2 | | Hauteur de débalancement de la latte | Haut de l'extrémité de la latte par rapport à son centre lorsqu'une force est appliquée à une extrémité | 1 po | Maximal | Étude qualitative |
| | 3 | | Distance | Distance maximale parcourue par la latte | 4 po | ± ¼ po | Étude préliminaire d'ingénierie |
| | 4 | Limiter le bruit du produit | Bruit du système | Bruit émis lorsque la latte descend jusqu'à arrêt | 55 dB | Maximal | Muzet (2007) |
| | 5 | Respecter un style aérien et guider les lattes au centre du matelas | Longueur totale du système de guidage | Longueur maximale du système de guidage centralisé | 12 po | Maximal | Entrevue client |
| Suspension | 6 | Ajuster la compliance de chaque latte en fonction du client | Rigidité moyenne calculée pour un confort optimal | Constante de raideur approximative | 2.5 kg/po | Moyenne | Étude d'ingénierie |
| | 7 | | Nombre de modules de suspension par latte | La force de réaction doit être la même pour toute la longueur de la latte | 1 | Maximal | Étude d'ingénierie |
| Structure | 8 | Faciliter l'assemblage du matelas complet chez le client | Temps d'assemblage | Temps nécessaire pour assembler tout le matelas chez le client | 2h00 | Maximal | Entrevue client |
| | 9 | | Assemblage modulaire | Diviser la conception du matelas en modules de manière à faciliter l'assemblage | 2 modules principaux | Maximal | Entrevue client |
| | 10 | Faciliter la maintenance des pièces critiques | Temps de maintenance annuel | Le temps de maintenance annuel par un technicien de l'entreprise | 1 h | Maximal | Entrevue client |
| | 11 | | Accessibilité des pièces critiques | Les pièces critiques, ou plus susceptibles de briser, doivent être accessibles sans changer d'autres pièces | ND | ND | Entrevue client |
| | 12 | Respecter les standards des lits simples de haute qualité | Dimension du matelas | Le matelas doit pouvoir entrer dans une base de lit simple | Lit simple: 38 po X 74 po | Nominal | Étude qualitative |
| | 13 | | | Le matelas doit être d'une hauteur maximale fixe | 20 po | Maximal | Entrevue client |

| | # | Fonctions | Spécifications | Définition | Niveau | Flexibilité | Source |
|--------------|----|--|--|--|-------------------------|-------------|--|
| | 14 | Respecter les dimensions des standards des lits simples de haute qualité | Coût de fabrication du matelas | Coût de fabrication total du matelas simple | 8 000 \$ | Maximal | Entrevue client |
| | 15 | Comporter des sections de rigidité différente à sa surface | Nombre de sections différentes | Nombre de sections différentes ajustable en rigidité | 15 lattes | ND | Étude d'ingénierie |
| | 16 | Résister aux efforts dans toutes les directions | Efforts ressentis par la structure due à l'utilisateur assis sur une latte | Lorsque l'utilisateur met tout son corps sur l'extrémité d'une seule latte (utilisateur du 95e percentile) | 215.4 lb (dans l'armée) | Maximal | Anthropometry and Mass Distribution for Human Analogues (Military Male Aviators March 1988) |
| | 17 | Empêcher le coincement d'un membre | Distance entre les lattes | La distance minimale entre deux lattes pour éviter le coincement lors du mouvement | 1 po | Maximal | Étude d'ingénierie |
| | 18 | Expédier le produit de l'entrepôt à Nicolet au client | Respecter la limite de poids du transporteur UPS | Limite de poids | 70 kg | Maximal | Site: https://www.ups.com/ca/fr/help-center/packaging-and-supplies/weight-size.page |
| | 19 | | Respecter la longueur maximale d'un colis du transporteur UPS | Longueur maximale | 108 po | Maximal | Site: https://www.ups.com/ca/fr/help-center/packaging-and-supplies/weight-size.page |
| | | | | | | | |
| Mécatronique | 20 | Utiliser une source d'énergie standard | Source d'énergie | Choix de la source d'énergie | 120 VAC | ND | Entrevue client |
| | 21 | Limiter le temps de changement de raideur de toutes les lattes | Temps d'ajustement | Temps nécessaire pour ajuster la raideur de toutes les lattes | 5 min | Maximal | Entrevue client et Étude d'ingénierie |
| | 22 | Désactiver la suspension lors de la pratique d'autres activités | Temps d'ajustement | Temps nécessaire pour désactiver la suspension de toutes les lattes | 1 min | Maximal | Entrevue client |
| | 23 | Changer la suspension selon la position de l'utilisateur | Temps d'ajustement | Temps nécessaire pour changer la suspension entre deux positions | Entre 30 sec et 1 min | Maximal | Entrevue client |

CHAPITRE IV

CONCEPTION DÉTAILLÉE DU MATELAS

Le matelas a été conçu, fabriqué et testé expérimentalement. Celui-ci comprend quatre systèmes distincts: le système de guidage, le système de suspension, le système mécatronique et le système structure, sur lesquels reposent une surface d'accueil et son utilisateur (Figure 4-1 et Figure 4-2). La surface d'accueil, ignorée jusqu'à maintenant, n'est pas utilisée pour donner une raideur précise, mais plutôt pour améliorer la sensation de confort d'accueil en filtrant la délimitation entre les lattes.

Ce chapitre est séparé en quatre afin de présenter la conception mécanique de ces systèmes. Le système de guidage et le système de suspension sont les deux plus critiques et sont donc présentés en détail tout en positionnant judicieusement le concept choisi relativement à la littérature. Les systèmes mécatronique et structure sont également expliqués afin de comprendre le fonctionnement du matelas ajustable.

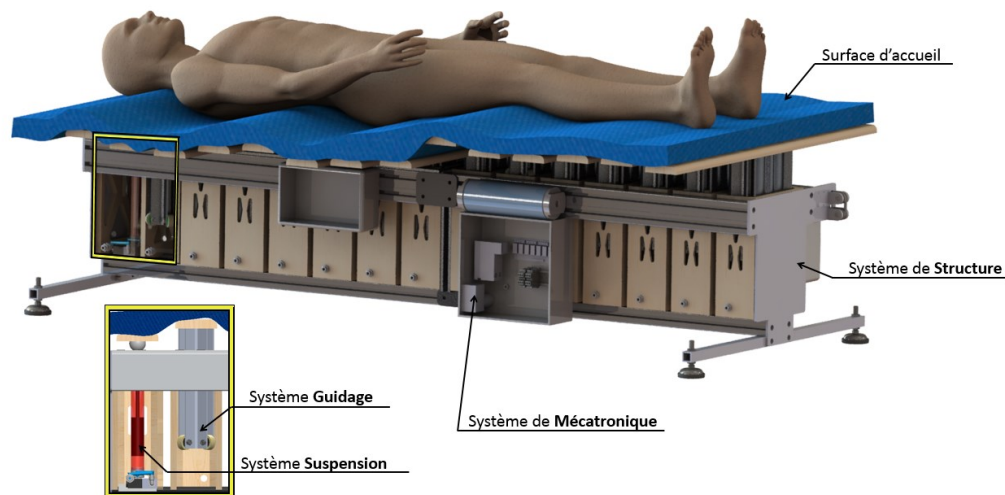


Figure 4-1 : Vue globale du dessin 3D du matelas ajustable



Figure 4-2 : Vue latérale du matelas ajustable

4.1 Système de guidage

La principale fonction du système de guidage est de déplacer les lattes selon une translation verticale seulement, peu importe l'endroit où la force est appliquée, afin d'assurer la stabilité du matelas. La translation des lattes se fera lorsqu'une personne s'installe sur le matelas, souhaite changer de position, ou pour toute autre activité qui fait bouger les lattes. Le Tableau 4-1 rappelle les spécifications reliées au système de guidage.

Tableau 4-1 : Spécifications du système de guidage

| # | Fonctions | Spécifications | Définition | Niveau | Flexibilité |
|---|---|---------------------------------------|---|--------|----------------------|
| 1 | Guider la descente de la latte | Force de frottement | Force minimale pour qu'il y ait mouvement de la latte, sans suspension | 5 N | Maximal |
| 2 | | Hauteur de débalancement de la latte | Haut de l'extrémité de la latte par rapport à son centre lorsqu'une force est appliquée à une extrémité | 1 po | Maximal |
| 3 | | Distance | Distance maximale parcourue par la latte | 4 po | $\pm \frac{1}{4}$ po |
| 4 | Limiter le bruit du produit | Bruit du système | Bruit émis lorsque la latte descend jusqu'à arrêt | 55 dB | Maximal |
| 5 | Respecter un style aérien et guider les lattes au centre du matelas | Longueur totale du système de guidage | Longueur maximale du système de guidage centralisé | 12 po | Maximal |

Le système de guidage central comprend quatre composants importants : l'extrusion personnalisée, les roulettes de polyuréthane, la cage contact de bois et la latte (Figure 4-3). L'extrusion maintient les roulettes qui roulent verticalement, sans bruit et avec peu de frottement, dans la cage de bois.

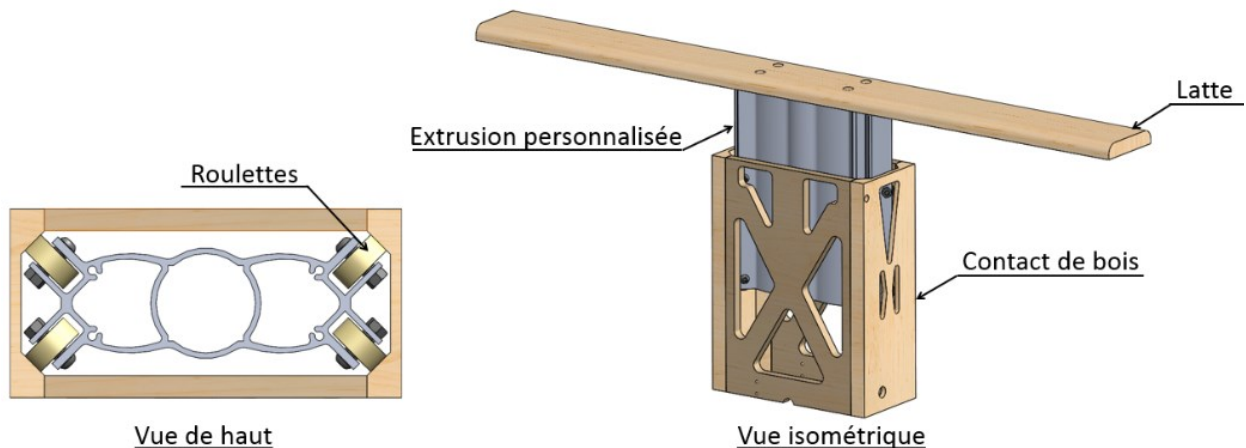


Figure 4-3 : Composantes du système de guidage

Selon Fundamentals of Design du MIT (2012), il existe plusieurs types de montage permettant un mouvement linéaire à un degré de liberté (Figure 4-4).

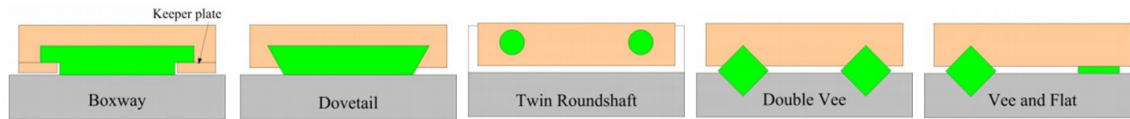


Figure 4-4 : Exemples de système à 1 ddl, tiré de Fundamentals of Design du MIT, (2012)

La solution adoptée s’inspire fortement des concepts « Double Vee » et « Dovetail » de la Figure 4-4. La solution choisie offre également des surfaces de contact à angle, mais est conçue avec un seul pilier central afin d’accueillir une seule suspension par latte.

Les sections suivantes présentent le choix des roulettes, de la cage de bois, de l’extrusion et de la latte tout en répondant aux spécifications mentionnées précédemment.

4.1.1 Roulettes

La principale difficulté du guidage est de réduire complètement « l’effet tiroir » afin de limiter le guidage à une force de frottement de 5 N afin de simuler le plus fidèlement possible la force de suspension requise. De plus, le système doit se déplacer sur une distance de 4 po tout en étant supporté par le centre seulement.

4.1.1.1 Choix du roulement

Cette section explique le bénéfice d’utiliser un roulement plutôt qu’un système de glissière. La Figure 4-5 illustre les variables géométriques et les forces engendrées dans le cas où une force d’appui (F_{appui}) est appliquée sur une latte. Le poids de la latte étant inclus dans la force d’appui, on considère, par conservatisme, que F_{appui} est complètement décentrée par rapport au centre du lit et que la base est à une largeur Δs maximal (selon les besoins du client).

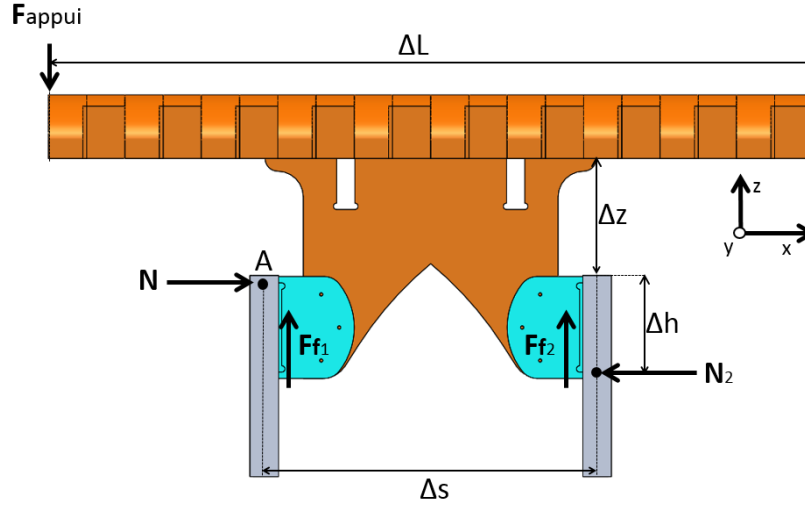


Figure 4-5 : Analyse du guidage d'une latte pour un modèle centralisé

En faisant le DCL du système, on a :

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ N_1 - N_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \sum F_z &= 0 \\ F_{appui} &= F_{f1} + F_{f2} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$F_{f1} = F_{f2} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \sum M_A &= 0 \\ F_{appui} \cdot \frac{(\Delta L - \Delta s)}{2} - N_2 \cdot \Delta h + F_{f2} \cdot \Delta s &= 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Selon l'équation 2.3, on considère que F_{appui} est d'environ 100 N (soit le poids des hanches d'une personne d'environ 80 kg). Les forces de frottement (F_{f1} et F_{f2}) sont considérés comme identiques ($F_{f1} = F_{f2}$). Puis, la force normale (N) est définie comme étant fonction de la force de frottement F_f et du coefficient de frottement μ_f avec

$$N = \frac{F_f}{\mu_f} \quad (2.5)$$

Voici la nouvelle équation qui détermine le coefficient de frottement en fonction du frottement et du choix de Δh .

$$u_f = \frac{F_{f2} \cdot \Delta h}{F_{appui} \cdot \frac{(\Delta L - \Delta s)}{2} + F_{f2} \cdot \Delta s} \quad (2.6)$$

En faisant varier les paramètres de Δh , voici le graphique qui en découle :

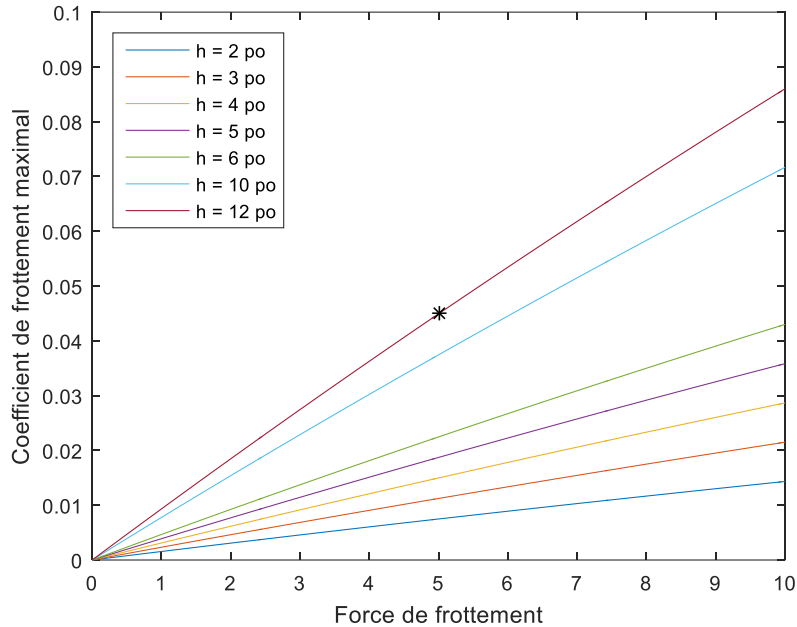


Figure 4-6 : Coefficient de frottement d'un système à friction en fonction de la force de frottement

Afin de limiter la force de frottement à une valeur de 5 N et en concevant le système avec un Δh de 300 mm (12 po), le coefficient de frottement (u_f) doit être d'au plus : 0,045 tel que ciblé par une étoile sur le graphique de la Figure 4-6.

Un coefficient de 0,045 est atteignable seulement par roulement où les coefficients de frottement passent alors de 0,1 à 0,2 (cas du glissement) à 0,002 jusqu'à 0,1 (cas du roulement - Wiemer et coll., (1998). C'est pourquoi il a été décidé de concevoir le système en utilisant un système de guidage à roulement.

4.1.1.2 Bruit et interchangeabilité des lattes

Les roulettes ont été fabriquées en combinant des rondelles de polyuréthane de grade 90 A, à des roulements à billes. Les rondelles de caoutchouc de grade élevé présentent plusieurs avantages :

- Réduire le bruit
- Assurer un contact sans glissement sur la cage de bois.
- Facilement usinable

Afin d'assurer l'interchangeabilité de position des sections, une grande précision de dimension externe des roulettes était requise, les rondelles ont donc été fabriquées sur-

mesure. Les roulettes ont été réalisées à partir de tubes de caoutchoucs usinés précisément au tour conventionnel, coupés pour former des rondelles, puis insérées à la presse à l'extérieur des roulements à billes (Figure 4-7).



Figure 4-7 : Diamètre extérieur des roulettes enduit de polyuréthane 90A de 1,250 po

L'utilisation de la presse permet d'obtenir un assemblage totalement contraint pour éviter tout mouvement relatif entre les roulements et le caoutchouc. Or, l'insertion cause un accroissement du diamètre extérieur total des roulettes. Des essais expérimentaux ont permis de trouver les bonnes cotes de dimensionnement, de diamètre extérieur des rondelles de caoutchouc (Machining of Polyurethanes, 1996). Après usinage des 120 roulettes, la tolérance sur le diamètre extérieur total s'avère être de $1.250 \text{ po} \pm 0.010$.

Afin de bloquer cinq degrés de liberté, cinq contacts sont nécessaires. Ainsi, le nombre minimal de roulettes est de cinq, soit deux sur l'étage du haut et trois sur celle du bas. Cependant, l'utilisation de huit roulettes a permis de : faciliter la conception géométrique de l'extrusion, assurer un contact constant avec au moins cinq roulettes et optimiser le déplacement de la latte dans le cas d'une force décentrée.

4.1.2 Cage de contact en bois

Les spécifications de la cage de contact en bois se résument à ceux-ci :

- Stabiliser le système sur la structure du matelas sans en affecter les propriétés mécaniques pour qu'il ne nuise pas au déplacement des roulettes;
- Installation simple, rapide, la même pour tous, sans nécessité de maintenance;
- Usinage et assemblage précis afin d'assurer un contact avec les roulettes;
- Interchangeabilité des pièces et systèmes.

4.1.2.1 Usinage et assemblage

La cage est formée de deux pièces, chacune d'elles découpées à la toupie CNC dans une plaque de merisier russe d'épaisseur $\frac{3}{4}$ po, puis collées (Figure 4-8).

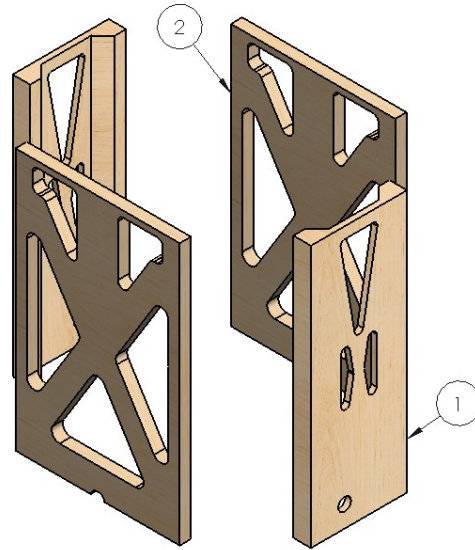


Figure 4-8 : Assemblage de la cage de contact en bois

Le bois est utilisé pour sa légèreté, son usinabilité, et son coût. Le merisier russe a été choisi étant donné sa bonne dureté en plus d'être composé de nombreuses couches épaisses superposées qui facilitent l'usinage du trou transversal (à travers des couches) sans se délaminer.

4.1.2.2 Fixation et installation

La fixation de la cage doit se faire directement sur la structure du simulateur. Or, la structure, faite en extrusion d'aluminium de type BOSH possède une tolérance de parallélisme assez faible. En effet, Bosch Rexroth Corp (2011) indique que la tolérance de rectitude du profil est de $\pm 1,5$ mm soit $\pm 0,059$ po sur une longueur de 2 000 mm (Figure 4-9).

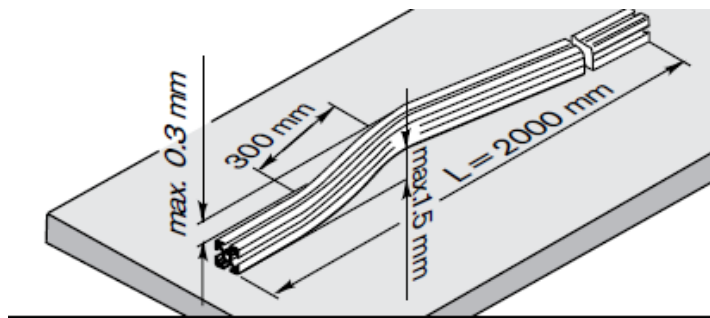


Figure 4-9 : Tolérance longitudinale de la rectitude d'un profil BOSH (Bosch Rexroth Corp, 2011)

Il est donc impossible de venir coincer la cage de bois entre deux extrusions BOSH sachant que leur parallélisme serait de ± 3 mm, une tolérance insuffisante pour empêcher le mouvement des cages de bois.

La fixation choisie est illustrée à la Figure 4-10. Elle ne nécessite qu'une seule vis (2) par cage (1), une extrusion ronde en aluminium soudée sur l'extrusion BOSH (3) et une plaque de positionnement en plastique (4). La cage de bois est insérée entre les griffes de la plaque de positionnement, puis clipsée sur l'extrusion ronde et vissée dans l'extrusion d'un côté (5). Une force de préhension des doigts est nécessaire pour ouvrir les griffes avant l'insertion de la cage. Le trou de forme hémisphérique (A) de la cage de bois permet de clipser celui-ci sur l'extrusion d'aluminium ronde (3) ce qui contraint tous les degrés de liberté sauf la rotation autour de l'axe longitudinal du matelas. Ensuite, la vis (2) est complètement vissée dans un écrou de type BOSCH, dans l'extrusion de côté (5), ce qui permet un encastrement complet.

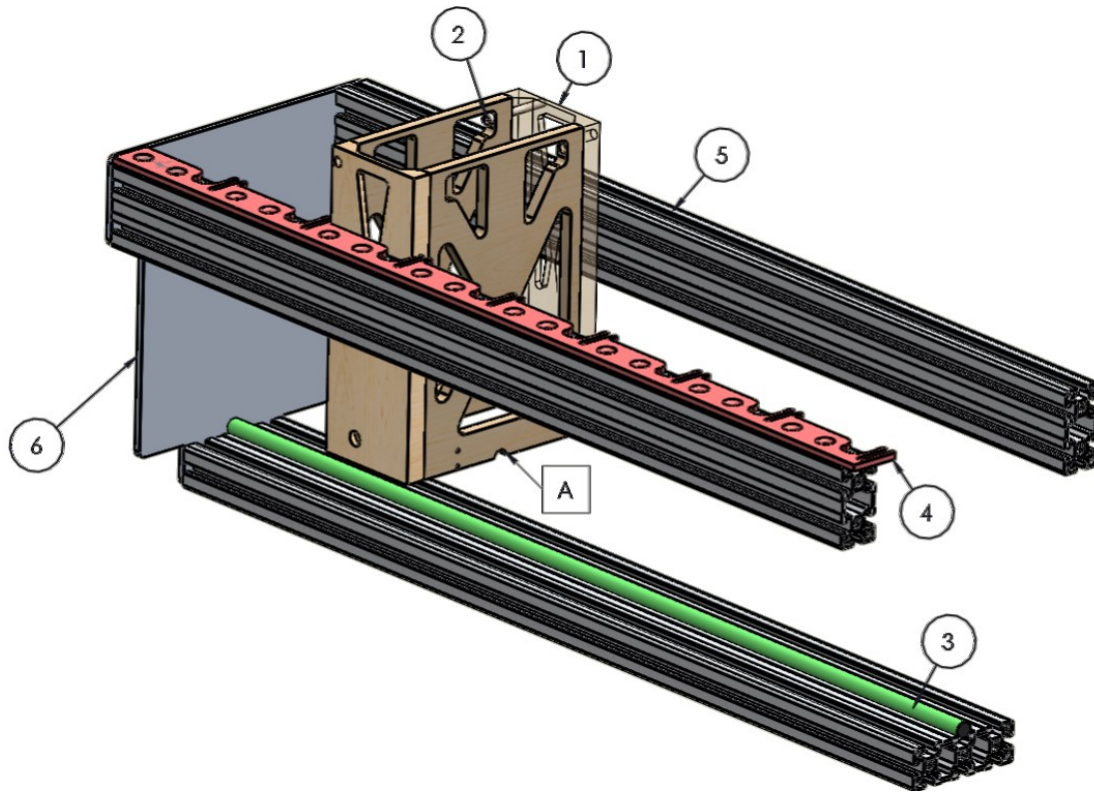


Figure 4-10 : Fixation de la cage de contact en bois

4.1.2.2.1. Plaque de positionnement en plastique

La plaque de plastique (4) est utile afin de définir la position des cages de bois sur la structure du matelas. Celle-ci est faite en plastique acétal (Delrin®) utilisé pour sa limite élastique et sa rigidité élevées (pour un plastique), ce qui permet de la plier facilement avec la force des doigts. Le tableau 3 montre les propriétés mécaniques du Delrin® et la Figure 4-10 montre l'effet d'une déformation de 0.0905 po (2.2976 mm) lorsque les griffes de la plaque viennent coincer la cage de bois.

Tableau 4-2: Propriétés de l'acétal (Delrin®) (cf.Grades of Delrin ® | DuPont™ Delrin ® | É.-U.)

| Caractéristiques | Symbole | Valeur | Unité |
|----------------------------------|----------------|--------|-------|
| Limite élastique | $Re_{0.02}$ | 67 | MPa |
| Contrainte maximale à la rupture | σ_{max} | 67 | MPa |
| Module de rigidité | E | 2.8 | GPa |
| Coefficient de poisson | ν | 0.35 | --- |

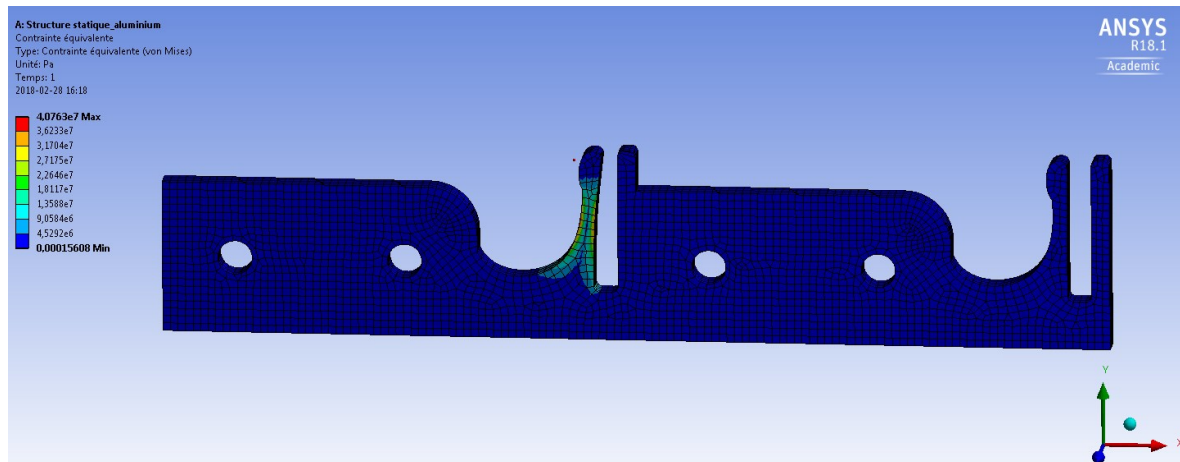


Figure 4-11 : Contrainte induite dans le matériau, selon la méthode de Von Mises, pour une déformation définie à 0.0905 po, avec le logiciel ANSYS.

Une contrainte de 40.76 MPa est induite dans le matériau, pour une déformation de 0.0905 po (lorsque les griffes de la plaque viennent coincer la cage de bois) ce qui résulte en un facteur de sécurité de 1.69. Le défaut de cette conception est qu'elle ne prend pas en considération deux aspects importants :

- La fatigue du matériau lors du mouvement de torsion répétitif des blocs de bois;
- Une déformation plus élevée du plastique lorsqu'il y a torsion dans le bloc de bois, ce qui induit une force plus grande entre ses griffes;

Ainsi, après répétition de plusieurs tests sur le lit, quelques griffes ont atteint la limite à la rupture à l'endroit prévu par l'étude par éléments finis. Bien que fonctionnel pour le prototype, ce concept nécessite d'être révisé pour une version commerciale du simulateur.

4.1.3 Extrusion personnalisée

L'extrusion personnalisée doit répondre à trois exigences majeures (Figure 4-12):

- Tenir les roulettes
- Offrir un espace pour la suspension qui contrôle l'impédance du simulateur
- Tenir la latte

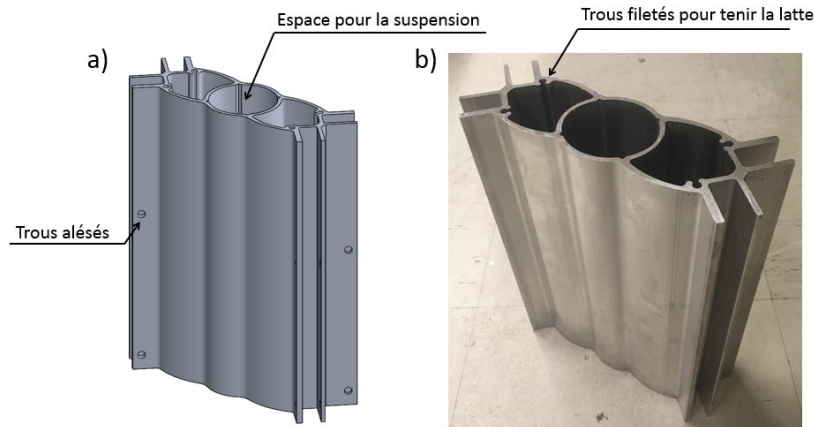


Figure 4-12 : Extrusion personnalisée a) dessinée sur SolidWorks b) Extrusion de la compagnie *Extrudex (Lévis, QC, Canada)*

Des vis à épaulement sont insérées dans les trous alésés, à 0.250 po, en porte-à-faux, à travers le trou qui passe à travers les deux ailettes de l'extrusion (Figure 4-12). L'espace pour la suspension est de forme géométrique ronde, mais possède des coins carrés internes lui permettant de s'adapter à divers types de suspensions. Enfin, les trous filetés permettent d'y insérer une vis mécanique à tête plate afin de tenir la latte par coincement (Figure 4-12).

L'extrusion a été produite par l'entreprise *Extrudex Inc. (Lévis, QC, Canada)*. Différentes exigences ont été imposées par l'entreprise pour assurer la bonne fabrication de l'extrusion. Le dessin final est disponible à l'Annexe A.

- La largeur de l'extrusion (L) doit être d'au maximum 8 po pour utiliser la presse présente à Lévis et éviter des frais de transport trop importants (Figure 4-13);
- L'angle θ (Figure 4-13) doit être d'au minimum 60° afin de laisser passer le moule de fabrication;
- L'épaisseur minimale des parois doit être de 0.250 (1/4) po sauf l'épaisseur de la cote (c) qui doit être à 0.180 po afin d'assurer un certain parallélisme des ailettes 1 et 2;
- La distance (d) aura une tolérance de ± 0.018 po ce qui influencera le contact des roulettes.

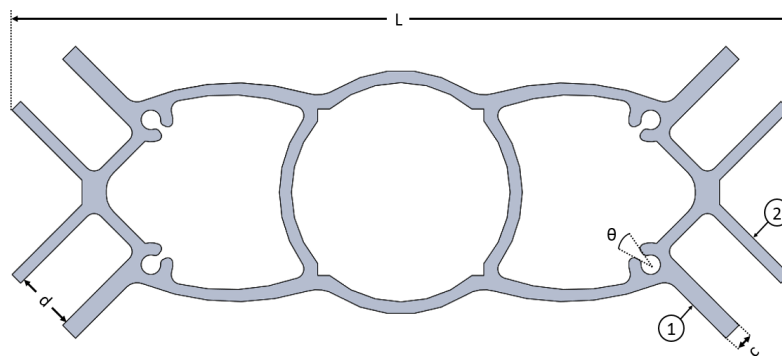


Figure 4-13 : Exigences imposées par Extrudex sur la géométrie de l'extrusion personnalisée

4.2 Système de suspension

La fonction du système de suspension est d'offrir une impédance adéquate pour tout utilisateur de distribution de masse et physionomie différente tout en étant ajustable selon la position prise par l'individu (dorsale, latérale ou ventrale). Les principales spécifications sont les suivantes :

Tableau 4-3 : Spécifications du système de suspension

| # | Fonctions | Spécifications | Définition | Niveau | Flexibilité |
|---|---|---|---|----------------|-------------|
| 6 | Ajuster la compliance de chaque latte en fonction du client | Rigidité moyenne calculée pour un confort optimal | Constante de raideur approximative | 2.5 kg/po | Moyenne |
| 7 | | Nombre de modules de suspension par latte | La force de réaction doit être la même pour toute la longueur de la latte | 1 module/latte | Maximale |

De plus les besoins importants à considérer sont les suivants :

- Interchangeabilité rapide de la suspension en cas de bris
- Limiter le bruit du produit
- Permettre le retour des sections à la position initiale plane
- Possibilité de désactiver la suspension lors de la pratique d'autres activités

Dans le cadre de cette maîtrise, deux solutions de suspension ont été comparées expérimentalement afin de comparer les deux stratégies de conception d'un matelas personnalisé décrites au Chapitre 2.3. Étant donné que l'objectif de la suspension est d'offrir un mécanisme qui pourra atteindre toutes forces et positions possibles du profil d'un humain, les deux stratégies comparées sont d'offrir un changement de raideur, avec un mécanisme pneumatique, et une pré-compression d'un élément compliant avec un ressort de compression. Les sections qui suivent présentent les conclusions de cette comparaison. Le chapitre 4.2.1 présente l'état de l'art d'une suspension à ressorts (variation de pré-compression de raideur) et le chapitre 4.2.2 qui décrit la valeur ajoutée d'une suspension pneumatique (variation de raideur).

4.2.1 Étude d'une suspension à ressorts

Bien qu'à moindre coût unitaire et facilement interchangeable en cas de bris, la conception d'un système de suspension à ressorts doit considérer plusieurs facteurs importants:

1. Sachant que les points d'opération se situent entre une force de 0 à 100 N (pour la masse d'une section du corps) et un déplacement de 0 à 4 po (pour atteindre le bon profil), la constante de raideur nécessaire est d'environ 2.5 kg/po. Le ressort, si on considère le même pour chaque latte, devra être peu rigide et très long. Conséquemment, le ressort aura tendance à flamber dès qu'il sera déformé et il sera absolument nécessaire de guider son mouvement. Ceci fait donc augmenter le nombre de pièces à assembler.

2. De plus comme le ressort peut flamber, il aura tendance à venir s'appuyer sur les parois de guidage (par exemple un tube) pour créer du bruit, qu'il faut palier en utilisant un ensachement approprié.
3. En étant précontraints, les ressorts reviennent à leur position de repos en créant une force donnée. Dans le cas où personne n'est couché sur le lit, toutes les lattes doivent se situer à la même hauteur pour créer une surface plane. Il faut donc bloquer le retour du ressort à une hauteur fixe, ce qui complexifie légèrement le design et l'installation.
4. La longueur initiale du ressort étant grande, elle augmentera nécessairement la hauteur totale du matelas, qui ne doit pas dépasser 20 po selon les besoins du client.
5. Lors de la pratique d'autres activités, la suspension des sections devra être désactivée afin de ne laisser que la couche d'accueil comme couche de confort. Les deux solutions possibles seraient d'enlever les ressorts un à un du matelas, ou d'ajouter un mécanisme de blocage de translation des lattes, ce qui augmente encore une fois le nombre de lattes.
6. Le mécanisme d'automatisation est l'inconvénient majeur de ce système. L'ajustement de lattes indépendantes nécessite un actionneur par latte (moteur rotatif ou linéaire), ou un seul actionneur et 15 embrayages. Comme le coût des moteurs linéaires est très élevé, il a été jugé préférable d'ignorer cette option. La distribution de puissance de moteurs rotatifs est plutôt difficile, car elle requiert beaucoup de pièces à assembler afin de transférer le mouvement de rotation à en une translation (vis sans fin, poulies, engrenages, câble, etc.). Aussi, le bruit de moteurs rotatifs ne peut être négligé.

Tous ces facteurs ont fortement désavantagé le système de suspension à ressorts. Par contre, il serait possible de mitiger plusieurs de ces facteurs en éliminant le besoin B.6 du client : *Retour de toutes les lattes vers une hauteur commune lorsqu'elles ne sont pas sollicitées*. En effet, les facteurs #1 à 4 ne seraient plus des facteurs importants portant vers l'élimination des ressorts si le retour des lattes pouvait se faire n'importe où. En conséquence, les ressorts pourraient être beaucoup plus petits, plus rigides et auraient moins tendance à flamber. Seule la base de ceux-ci serait verticalement contrôlée afin d'atteindre les positions x_i des différents profils. Finalement, suite à des discussions avec le président de Matelas René, nous avons jugé bon de concevoir le matelas avec une suspension pneumatique. Celle-ci a l'avantage de n'avoir qu'une seule motorisation (une pompe) et différents actionneurs (15 vérins pneumatiques). La section suivante décrit et justifie le choix de ce système de suspension.

4.2.2 Description du système pneumatique

Le système de suspension choisi est de type pneumatique et comprend six entités importantes pour chaque latte: un cylindre pneumatique (1), un pivot supérieur (2), un pivot inférieur (3-4), des tubes d'acheminement d'air (5) et une valve solénoïde (6) (Figure 4-14).

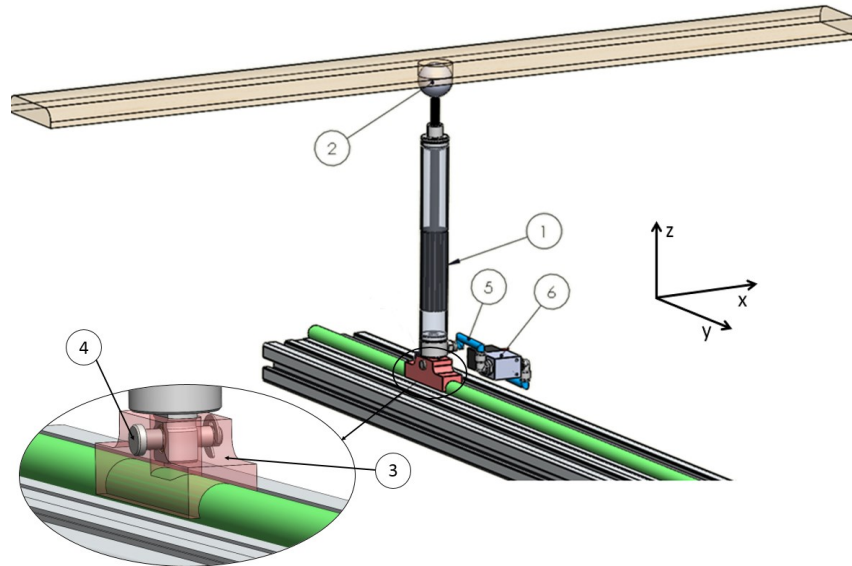


Figure 4-14 : Entités du système de suspension

Face aux considérations présentées dans le système de ressorts, le système pneumatique comprend son propre guide et sa longueur maximale est intrinsèquement définie. Le système conçu ne nécessite qu'un seul actionneur (une pompe), un réservoir, un régulateur de pression, un capteur de pression, 15 valves solénoïdes, 15 cylindres pneumatiques et des tubes d'air.

Les pivots de la Figure 4-14 (2, 3, 4) permettent d'éviter les forces désaxées dans un axe différent de l'axe principal du vérin (z) afin d'éviter les fuites d'huile venant du joint du piston du vérin, les fuites d'air ou pire, le bris du vérin. Le pivot supérieur (2) est une sphère de plastique fileté connectée au piston du vérin et déposée sur une surface concave formée par enlèvement de matière sur la surface inférieure de la latte. Cette conception contraint les trois translations. Le pivot inférieur comprend les éléments 3 et 4 : l'élément 3 est un bloc en polyéthylène avec un trou hémisphérique lui permettant de se clipser sur l'extrusion ronde en aluminium. Le clip lui permet un seul degré de liberté soit la rotation autour de l'axe y. L'élément 4 comprend une goupille qui passe à travers la bague en bronze du vérin, et un circlip pour éviter que la goupille se dégage. L'ajout de cette goupille permet une rotation du cylindre pneumatique autour de l'axe x. Finalement, les pivots supérieur et inférieur permettent au vérin une rotation autour des axes x et y afin d'éviter les forces désaxées sur le piston, soit des forces qui pourraient subvenir sur une extrémité ou l'autre de la latte.

L'orientation du vérin (le piston orienté vers le haut) permet d'éviter de déplacer tout le vérin, évite également le mouvement des tubes d'air (6) afin qu'ils ne soient pas sollicités mécaniquement et prévient également les fuites d'huile. Le port du vérin, situé à sa base, permet l'installation et la désinstallation facile du vérin en cas de bris, en enlevant tout simplement le tube d'air et la goupille. Le reste du système pneumatique n'est jamais débranché.

Finalement, les ensembles de guidage sont seulement déposés sur les suspensions sans y être rattachés. Cette conception a plusieurs avantages :

- Permet de placer les ensembles de guidage sur n'importe quelle suspension et donc de manière aléatoire;
- Rend le système de suspension facilement accessible;
- Permet de changer facilement les roulettes du système de guidage si les tolérances ne sont pas acceptables;
- Facilite le transport;

Le chapitre suivant discute de l'automatisation de la suspension et de ses composants.

4.3 Système mécatronique

Le système de mécatronique comprend deux volets importants :

- Le choix du profil de suspension
- La transmission de puissance pneumatique et mécanique

Ces deux volets permettent de répondre aux spécifications suivantes :

Tableau 4-4 : Spécifications du système de mécatronique

| # | Fonctions | Spécifications | Définition | Niveau | Flexibilité |
|----|---|--------------------|---|----------------------------|-------------|
| 20 | Utiliser une source d'énergie standard | Source d'énergie | Choix de la source d'énergie | 120 VAC | ND |
| 21 | Limiter le temps de changement de raideur de toutes les lattes | Temps d'ajustement | Temps nécessaire pour ajuster la raideur de toutes les lattes | 5 min | Maximal |
| 22 | Désactiver la suspension lors de la pratique d'autres activités | Temps d'ajustement | Temps nécessaire pour désactiver la suspension de toutes les lattes | 1 min | Maximal |
| 23 | Changer la suspension selon la position de l'utilisateur | Temps d'ajustement | Temps nécessaire pour changer la suspension sans que l'utilisateur ne se réveille | Entre 30 secondes et 1 min | Maximal |

4.3.1 Choix du profil de suspension

Le choix du profil de suspension de l'utilisateur est entièrement relié à la position adoptée par l'utilisateur. En considérant le *Profil statique personnalisé* connu pour un minimum d'un individu, il est possible d'implanter la bonne pression qui en découle pour chaque section transversale du matelas. Comme trois positions sont généralement adoptées par la population: position dorsale, latérale et ventrale, la suspension du matelas se doit de s'ajuster automatiquement en fonction de la position de la personne. La distribution de masse reste la même, mais la personne adopte des positions différentes et son profil change en conséquence ce qui implique plusieurs ajustements différents.

La problématique est donc de connaître la position de l'utilisateur en temps réel en se limitant aux trois positions générales (dorsale, latérale et ventrale). La méthode qui a été choisie est de se servir du déplacement des lattes dans un cas où l'utilisateur est dans une position différente de celle implantée sur le matelas initialement. Par exemple, il est connu qu'une personne couchée dans une position latérale ressentira une plus grande charge au niveau des hanches que sur le dos, où la charge sera majoritairement au dos. Ainsi, dans le cas où la personne est couchée dans une position dorsale, mais se tourne sur un côté, les lattes au niveau des hanches auront tendance à descendre sous leur poids.

Un capteur laser infrarouge (de précision $\pm 0,1$ mm) a été implanté sous les lattes afin de connaître leur position en tout temps. Pour éviter le coût d'achat de 15 capteurs, un seul capteur est installé sur un chariot coulissant sur un rail linéaire sur toute la longueur du matelas afin de mesurer la hauteur de toutes les lattes une après l'autre (Figure 4-15). Le positionnement du laser (1) se fait grâce à un moteur DC (2) avec un encodeur intégré (3) qui actionne un système de poulies (4) et courroie (5) qui entraînent le chariot (6) sur le guide (7). Subséquemment, une nouvelle configuration sera implantée dans le système selon la latte qui a été affectée par le changement de position.

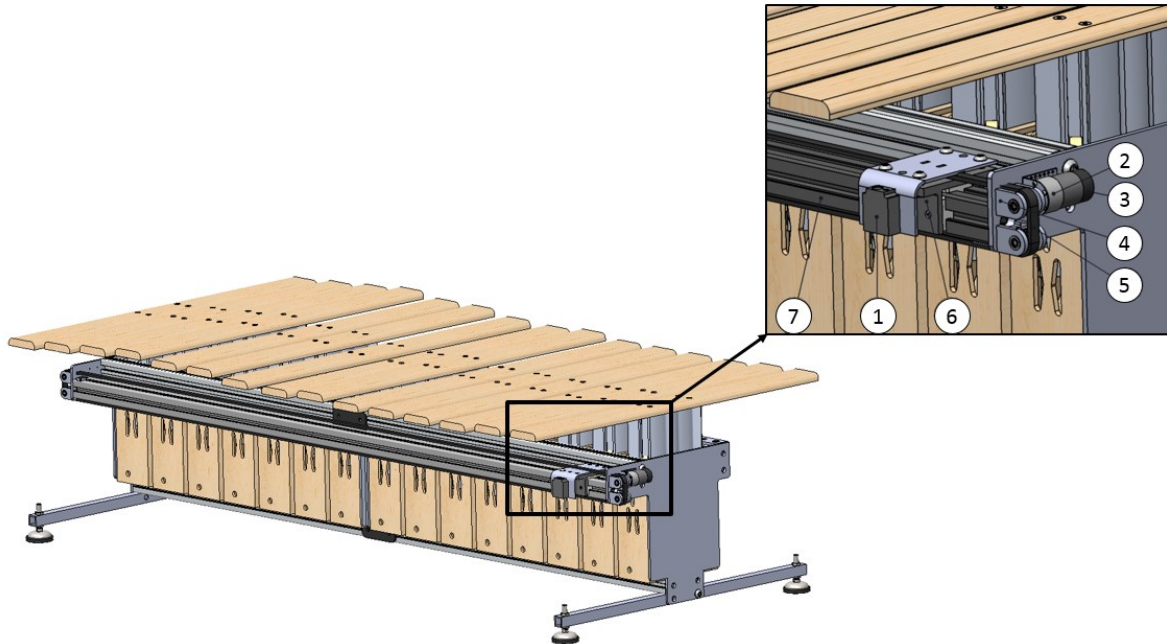


Figure 4-15 : Composants du système du capteur laser pour le choix du profil de suspension

4.3.2 Transmission de puissance pneumatique

Le matelas conçu offre également la possibilité de faire un contrôle en force sur chacune des lattes individuellement. Un régulateur de pression contrôle en boucle fermée la pression initiale des vérins (avant qu'une masse s'appuie sur les lattes) et ce activé par l'application *ISheeld* d'un téléphone intelligent. Voici le schéma de contrôle global qui répond à cet objectif (Figure 4-16).

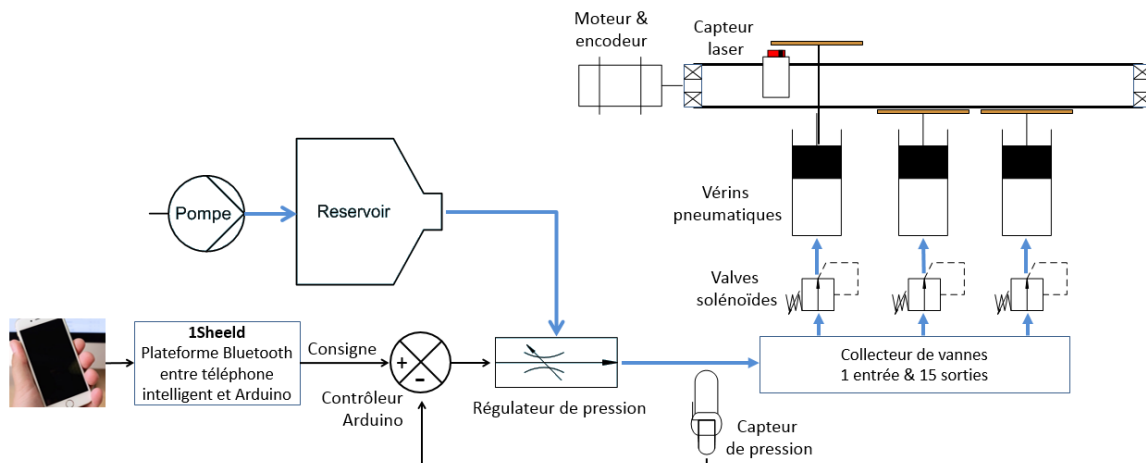


Figure 4-16 : Schéma de transmission de puissance pneumatique

Lors d'une première utilisation du matelas, l'utilisateur inscrit les pressions désirées de sa suspension pour chacune des 15 lattes sur l'application *ISheeld* de téléphone intelligent.

Les pressions désirées découlent du profil (F_i , X_i) obtenu préalablement grâce à l'outil instrumenté. La consigne est directement envoyée au contrôleur Arduino puis au régulateur de pression qui transforme le signal électrique 4-20mV en pression 0-60 psi (Figure 4-17 a. IP610 SERIES I/P CONVERTER¹, OMEGATM).

Un capteur de pression (Figure 4-17 b. MSP300 Pressure Transducer², TE connectivity) à la sortie du régulateur permet de contrôler, avec un contrôleur Proportionnel-Intégrateur (PI), la pression de 0 à 60 psi \pm 0.1 psi en moins de 5 secondes.

Le régulateur utilise l'air fourni par un réservoir (Figure 4-17 c. Non-Repairable Reservoir³, Bimba) rempli à l'aide d'une pompe à faible bruit (Figure 4-17 d. TM40A-E⁴, TOPSFLO).

L'air est ensuite acheminé vers les deux collecteurs de vannes qui distribuent l'air à des valves solénoïdes (Figure 4-17 e. DC 12V 2 Way Solenoid Air Valve⁵, Zilong) présentent pour chaque latte et ainsi l'air termine son trajet aux 15 vérins pneumatiques (Figure 4-17 f. 094.375-PBY⁶, Bimba). Les valves solénoïdes sont de type « normalement fermées » et s'ouvrent au signal électrique envoyé par le Arduino lorsqu'une latte est ciblée par un changement par le téléphone intelligent.

L'ajustement des 15 vérins pneumatiques se fait en ouvrant, à tour de rôle, chaque valve sur un intervalle régulier d'une latte à chaque 5 secondes. À cette fréquence, l'ajustement prend environ 1 minutes 15 secondes et respecte la spécification #21 de cinq minutes pour toutes les lattes. La désactivation de la suspension pour la pratique d'autres activités se fait encore plus rapidement grâce à la chambre de sortie du régulateur puisqu'il éjecte l'air directement dans l'environnement. Finalement, lorsqu'une personne est couchée sur le matelas, le changement de position se fait automatiquement grâce au sous-système du choix du profil de suspension préalablement décrit.

¹ <https://assets.omega.com/manuals/process-control-and-monitoring-devices/controllers/pressure-converters/M4062.pdf>

² <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtv&DocNm=MSP300&DocType=Data+Sheet&DocLang=English>

³ <https://www.bimba.com/Products-and-Cad/Safety--Production/Inch/Air-Reservoir/Round-Line-Style/Bimba-Non-Repairable-Reservoir>

⁴ <http://www.topsflo.com/mini-diaphragm-pump/tm40-e.html>

⁵ https://www.banggood.com/14inch-DC-12V-2-Way-Normally-Closed-Electric-Solenoid-Air-Valve-p-931694.html?rmmds=search&cur_warehouse=CN

⁶ <https://www.bimba.com/Products-and-Cad/Actuators/Inch/Round-Line/Non-Repairable/Original-Line-Cylinder>

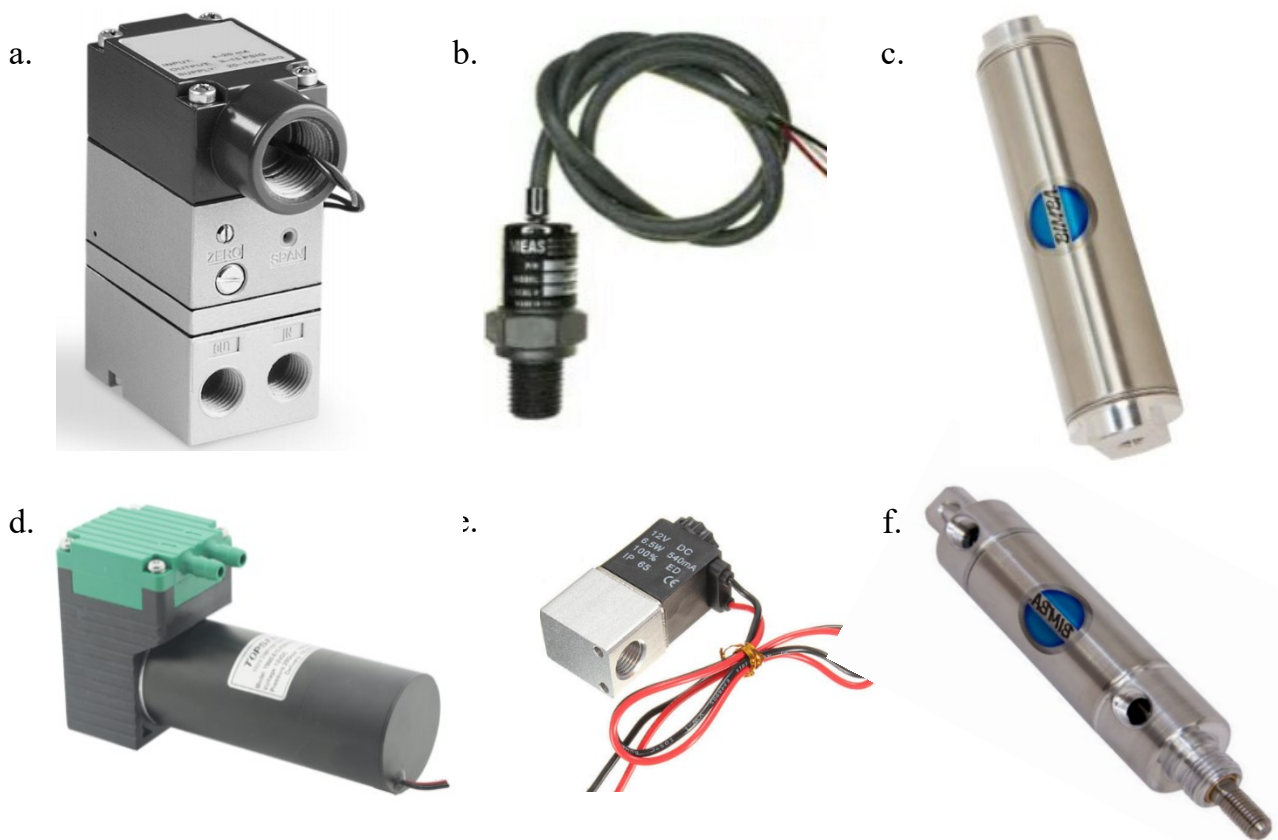


Figure 4-17 : Composants mécaniques pneumatiques utilisés :

- a. Régulateur de pression IP610 SERIES I/P CONVERTER, OMEGA™;
- b. Capteur de pression MSP300 Pressure Transducer, TE connectivity;
- c. Réservoir Non-Repairable Reservoir, Bimba;
- d. Pompe TM40A-E, TOPSFLO;
- e. Valve solénoïde DC 12V 2 Way Solenoid Air Valve, Zilong;
- f. Cylindre pneumatique 094.375-PBY, Bimba

La conception des pièces mécatronique et leur installation ont été réalisés avec l'accompagnement de François Martel. Le schéma électronique global du lit ajustable est présenté à l'Annexe B. Le code C++ du Arduino a été spécialement conçu par François Martel et se trouve à l'Annexe C.

4.4. Système structure

Le système de structure comprend toutes les pièces qui font la liaison entre les systèmes principaux, mais qui permettent également un assemblage rapide, une maintenance facile et une bonne accessibilité aux pièces critiques. Voici toutes les spécifications qui en découlent.

Tableau 4-5 : Spécifications du système structure

| # | Fonctions | Spécifications | Définition | Niveau |
|----|--|---|---|--|
| 8 | Faciliter l'assemblage du matelas complet chez le client | Temps d'assemblage | Temps nécessaire pour assembler tout le matelas chez le client | 2h00 |
| 9 | | Assemblage modulaire | Diviser la conception du matelas en modules de manière à faciliter l'assemblage | 2 modules principaux |
| 10 | Faciliter la maintenance des pièces critiques | Temps de maintenance annuel | Le temps de maintenance annuel par un technicien de l'entreprise | 1 h |
| 11 | | Accessibilité des pièces critiques | Les pièces critiques, ou plus susceptibles de briser, doivent être accessibles sans changer d'autres pièces | ND |
| 12 | Respecter les standards des lits simples de haute qualité | Dimension du matelas | Le matelas doit pouvoir entrer dans une base de lit | Lit simple: 38 po X 74 po Lit Queen: 59 po X 79 po Lit King: 76 po X 79 po |
| 13 | | | Le matelas doit être d'une hauteur maximale fixe | 20 po |
| 15 | Comporter des sections de rigidité différente à sa surface | Nombre de sections différentes | Nombre de sections différentes ajustable en rigidité | 15 lattes |
| 18 | Expédier le produit de l'entrepôt à Nicolet au client | Respecter la limite de poids du transporteur UPS | Limite de poids | 70 kg |
| 19 | | Respecter la longueur maximale d'un colis du transporteur UPS | Longueur maximale | 108 po |

Les dimensions générales du lit sont de 72.32 po de longueur, 37 po de largeur et 20 po de hauteur afin de rentrer dans une base de lit simple.

Afin de faciliter l'expédition, la structure du matelas a été conçue en plusieurs modules distincts (Figure 4-18⁷) séparés en deux modules de structures (A et B) et 15 entités de lattes complètes comprenant l'extrusion, la latte de bois et les roulettes (1). Chaque cage de contact de bois (2) et chaque suspension individuelle (3) sont préalablement assemblées sur la structure de manière à situer la position de chaque latte précisément. Des plaques d'aluminium permettent de rejoindre les deux modules de structure de chaque côté (4 et 5). Des pattes à hauteur ajustable permettent également de niveler le matelas (6).

⁷ NotaBene : À des fins de représentation, le sous-système « choix du profil de suspension » a été retiré de la figure.

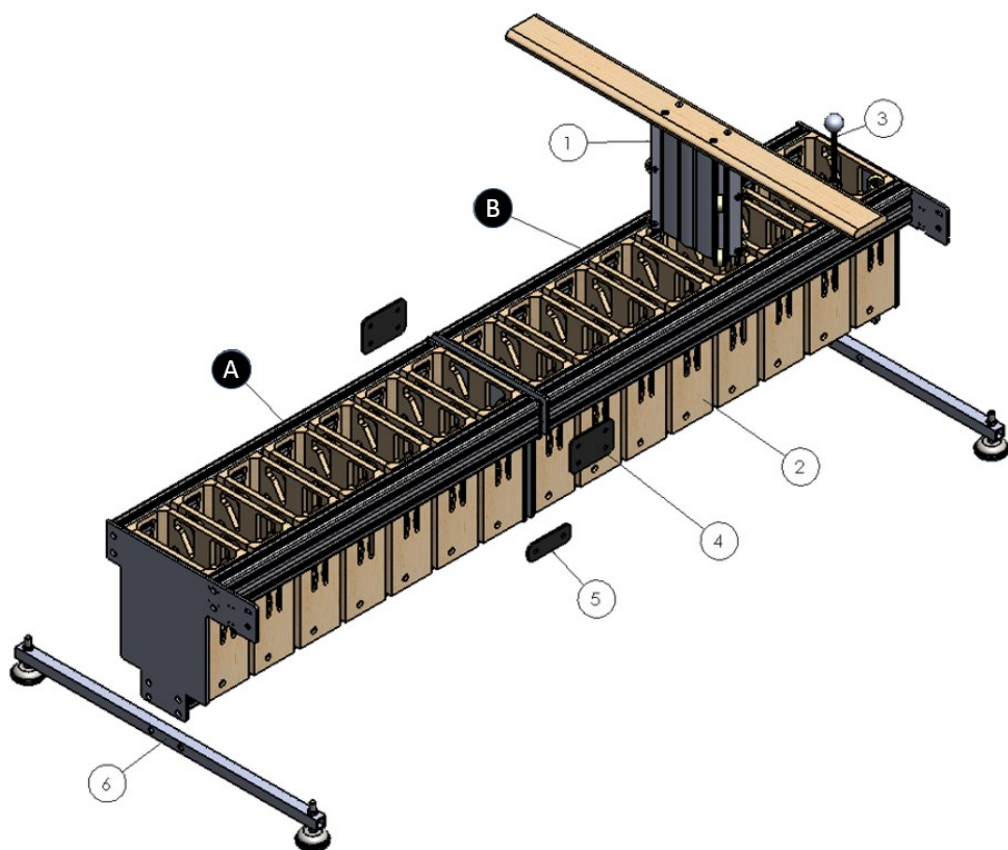


Figure 4-18 : Modularité du matelas

CHAPITRE V

CARACTÉRISATION DU MATELAS

Contribution de l'article dans le cadre du mémoire :

Cet article contribue à caractériser le matelas ajustable dans l'atteinte du *Profil statique personnalisé*. Il débute en relatant l'importance d'un profil statique, défini comme étant la combinaison d'une force de réaction égale au poids du corps au-dessus de lui, tout en ayant une position définie. L'article ajoute également une expérimentation et des résultats sur le confort dynamique.

Avant-propos

Auteurs et affiliation :

M.Leroux : Étudiante à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

F.Martel : Étudiant au doctorant, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

T.Zhang : Étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

A.Desrochers : Professeur titulaire, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

D.Rancourt : Professeur titulaire, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Date de soumission : 2019-05-17

Numéro du manuscrit : MD-19-1355

Revue: The American Society of Mechanical Engineering (ASME Journal of Mechanical Design)

Titre français: Conception d'un simulateur de matelas à rigidité variable, basé sur un profil personnalisé, utilisant des systèmes mécaniques pneumatiques.

Design of a variable stiffness mattress simulator based on a personalized profile using pneumatic mechanical systems

Marianne Leroux
François Martel
Tong Zhang
Alain Desrochers
Denis Rancourt

Department of Mechanical Engineering
University of Sherbrooke
Sherbrooke, QC, J1K 2R1 Canada
Denis.Rancourt@usherbrooke.ca
ASME membership: 5667035

Email: Marianne.Leroux@USherbrooke.ca

5.1. Abstract

One important factor to human sleep quality is certainly mattress comfort. Control of pressure points with the mattress and body posture when lying are both known to impact comfort. Hence, there is a consensus that a Static Personalized Profile for achieving comfort must include specific reaction forces with the mattress, as well as a mattress profile for a given user. In addition, mattresses most likely need to provide a non-infinite surface stiffness to adapt the mattress surface to errors in the profile estimate, or to account for user dynamic movements during the sleeping phase. The ideal local tangent stiffness needed is, however, currently unknown. Here, we design a mattress simulator that emulates a customized support profile, as well as a tunable range of surface stiffness, such that experimental studies can be conducted with humans to figure out what stiffness a mattress should ideally have. To that end, pneumatic pistons were selected for designing the simulator because of their convenience in adjusting both profile and stiffness values for a given user. The simulator consists of 15 lathes mounted on custom linear guides supported by pneumatic cylinders whose internal pressure is controlled to specific requirements. Static and dynamic experimental studies were conducted in order to validate the simulator functionality and closeness with theoretical mechanical behavior predictions. Although experimental results show good performance of the simulator, use of pistons leads to many application issues that affect its ability to precisely control either surface stiffness or personalized profile, due to their hysteresis.

5.2. Introduction

Humans spend in the order of eight hours a day sleeping in a bed. A mattress improperly suited for the body is apparently a major factor affecting the quality of sleep, which has a negative effect on social interactions, mood and often quality of life [1][2]. Although anthropometry (mass distribution, length and shape of body segments) vary significantly from one person to another [3], mattress manufacturers usually attempt to design mattresses that can fit as many body shapes as possible. Hence, every customer may not expect the same comfort, even for a given mattress.

Given the complexity of figuring out what mattress is a best fit for a person, studies were conducted to determine ideal mattress surface properties according to human anthropometry in static lying conditions. Using contact pressure with mattresses surfaces as a performance index, as well as human spine profile, comfort was evaluated for various support surfaces on which individuals were lying at rest. Studies were conducted for different surface materials, stiffnesses, subject shapes, lying positions and for several participants [4–9]. Studies that made use of a uniform stiffness support surface (either firm or soft surfaces) in a dorsal decubitus [4, 5] concluded that a firm support induces high pressure points at the hips and shoulders, as the trunk segment is not uniformly supported by the mattress. When the mattress is soft, hips and shoulders sink into the mattress, producing a spinal flexion and, still, pressure points at the same locations. Pressure point magnitudes and user's comfort were found to be different across support surface stiffnesses, and for different sleeping body postures. On a different point of view, researchers agreed that user's position, and more specifically spine curvature plays an important role for comfort when sleeping on a mattress because it influences the resulting human profile at static equilibrium [5, 10, 11].

Frequently, a proposed solution to control spine curvature is to divide the support surface into multiple sections of different stiffnesses, thereby minimizing pressure points for all body segments [12]. Similarly, Denninger et al., [11] suggested that an appropriate spine curvature can be obtained by supporting each body segment with a force equal to its own weight; if support forces are not well balanced, spine shear forces may occur and may lead to discomfort. An alternative approach to control spine curvature when resting on a bed surface consists in adjusting the height of different bed sectors, assuming a uniform contact surface stiffness. A study conducted by S. J. Park and al. (2009) [13] used this approach and found correlations with the subjective comfort ratings given by the subjects, as well as the resulting contact pressure points.

To our knowledge, there is currently not a clear understanding of how to design bed mattresses to achieve optimal comfort [14]. There is, however, a consensus in the literature that mattress personalization should be achieved through control of reaction forces exerted on the body segments to minimize pressure points, as well as control of the final body position, particularly spine curvature [15]. Hence, a personalized mattress could be described by a *Static Personalized Profile* (PP_s), defined by a set of body segment reaction forces on the mattress (\mathbf{F}) and body segment equilibrium positions (\mathbf{X}) when lying on the mattress, such that:

$$PP_s = (\mathbf{F}, \mathbf{X}) = (F_i, X_i) \quad (1)$$

with i ranging from 1 to n , n being the number of mattress independent sections.

However, this definition found in all the studies of this paper is limited to comfort during static equilibrium only, whereas discomfort on a mattress may as well occur when people change body configuration and orientation. For instance, when individuals roll over during sleep, a better body restoration is most likely achieved by highly resilient (high rebound) mattress toppers because it requires less muscle activity to achieve body reconfiguration [16]. As a result, as recommended by D. W.-C. Wong and al.(2019) [16], the *Static Personalized Profile* might be better defined by using static equilibrium and dynamic behavior characteristics such that it becomes:

$$PP = (PP_s, \mathbf{K}) \quad (2)$$

where \mathbf{K} is a vector where the K_i element is the local stiffness of the mattress segment i , evaluated at compression X_i of the surface. Controlling local stiffness for each body segment at its compression operating position X_i affects the dynamic properties of the mattress and hence, defines to what extent the body profile and contact forces vary when body configuration is dynamically modified during sleep. If variations are too important, discomfort may occur and could lead to awakenings that reduce restorative sleep.

In previous mattress stiffness studies [4], [5], the supporting surface stiffness (K_i), or more precisely static nonlinear mechanical impedance, is generally changed to get the lowest pressure points on body segments. However, changing stiffness directly influences the reaction forces applied to body segments and affects their X_i position. Hence, the *Static Personalized Profile* is actually found to be also dependent on K_i :

$$PP_s = (F_i, X_i) = f(K_i) \quad (3)$$

The profile dependence on surface stiffness is actually not desirable as suggested previously in Eq. (2). In human profile studies [13], a single uniform stiffness support surface is used to compare the impact of adjusting the height of different bed sectors. A unique stiffness support may smooth out height adjustments and indirectly impact the final position of the body, thereby biasing the *Static Personalized Profile*.

To our knowledge, there exists no support surface that can easily control PP_s without changing K_i independently. Such a surface is desirable in order to fully personalize a support surface.

Therefore, the aim of our study is to develop a bed simulator that can precisely guarantee PP_s for a given user, while allowing independent tuning of the apparent stiffness vector \mathbf{K} . Our premise is that this stiffness magnitude would be better identified through human experimentation. To that end, a simulator was made of 15 independent transverse lathes that are supported by pneumatic cylinders to control positions X_i for every segment, as well as the apparent stiffness K_i .

Before the bed simulator design is described, a brief theoretical analysis of the simulator is presented to better understand the technical requirements for the apparent stiffness tuning

mattress simulator. The design challenge is then to choose the most appropriate pneumatic cylinder to provide a large stiffness adjustment range. This is achieved through quasi static-analytical modeling of the pneumatic system. Finally, extensive experimental validation of the simulator shows that the simulator is able to provide repeatable experimental force-displacement curves and tunable apparent stiffness.

5.3. Simulator pneumatic model

The proposed simulator uses pneumatic cylinders to vary the apparent stiffness K_i while ensuring a given PP_s . It is assumed that such *Static Personalized Profile* is obtained through different means. For instance, PP_s values used for this study originated from an instrumented bed developed in our laboratory. It is composed of 40 sections (lathes) mounted on individual linear actuators and force sensors. The PP_s is obtained when a target contact force distribution is reached by iteratively controlling the 40 linear actuator positions. When the recorded contact force distribution is equal to a reference base body weight distribution, internal body shear forces are assumed to be minimal. In this situation, the lathes positions and contact forces are considered as providing the ideal PP_s (Eq.3) as illustrated and converted to 15 lathes in Fig.1. This profile comes from a 172 cm high, 58,9 kg, 26 years old man lying in a supine position.

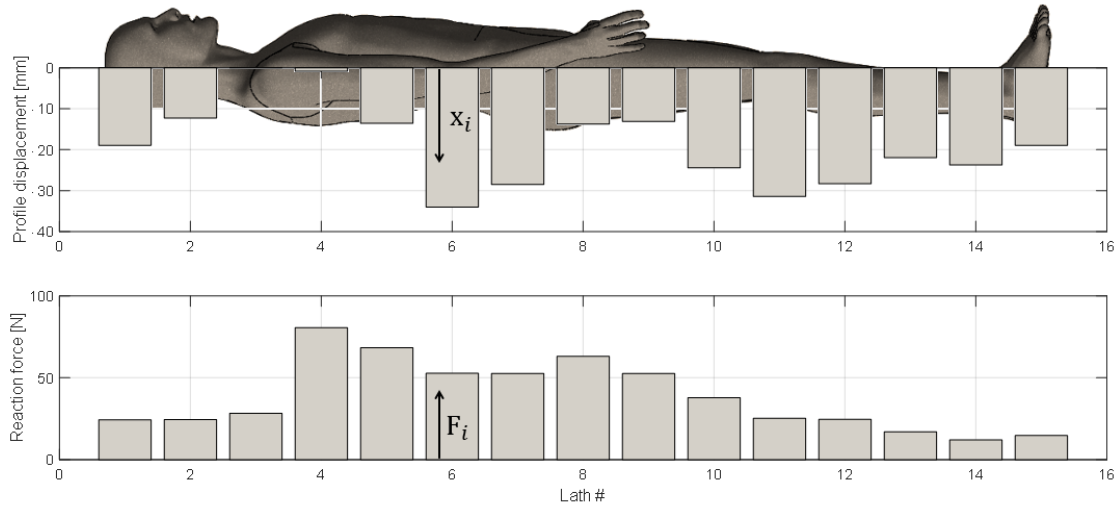


Figure 1: Not-to-scale comfort profile displacement x (mm) and force (N) for a given subject

The local apparent stiffness K of the pneumatic actuator is given by the first derivative of the cylinder force F , with respect to the vertical lath motion:

$$K = \left. \frac{dF}{dx} \right|_{x=x_i} \quad (4)$$

In static equilibrium conditions, assuming negligible friction, the contact force F balances out with forces shown on the free-body diagram of the single chamber pneumatic actuator (Fig.2) such that:

$$F = F_p - F_s - W \quad (5)$$

where F_p is the pneumatic cylinder force, W is the motion module weight, and F_s is the spring force. A spring is in fact incorporated into the cylinder chamber in order to bring the rod back to a fully retracted position.

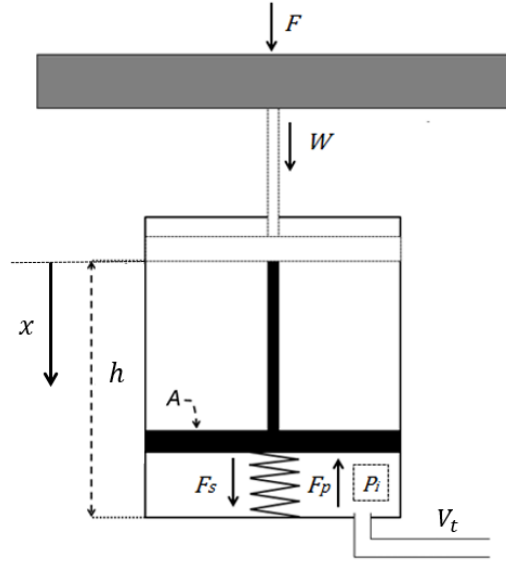


Figure 2: Free body diagram of the piston system

Internal force F_p is the pneumatic force acting on the piston of area A when the final pressure is reached after compression. Using the ideal gas law⁸ at constant temperature, the force is given by:

$$F_p = \left[\frac{P_{in} \cdot V_{in}}{V_f} \right] \cdot A \quad (6)$$

Replacing P_{in} , V_{in} , and V_f respectively as initial pressure, initial volume, and final volume with data and variables given in Fig.2, the air pressure induced piston force is finally obtained as:

$$F_p = \left[\left[\frac{(P_{in} + P_a) (A \cdot h + V_t)}{(A \cdot (h - X_i) + V_t)} - P_a \right] \cdot A \right] \quad (7)$$

where P_{in} is the input pressure in the system, P_a is the atmospheric pressure, h is the maximum vertical travel of the piston, V_t is the volume of the tubing network and X_i is used as the piston displacement as well as the lath position. Note that no air leakage is assumed.

Spring force F_s is modeled as a linear tension spring:

$$F_s = k_s \cdot (h - X_i) + F_o \quad (8)$$

⁸ $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$

where k_s is the piston spring stiffness constant and F_o is the pre-tension force of the spring when the piston is fully-retracted.

Variable W corresponds to the vertical motion module weight:

$$W = m \cdot g \quad (9)$$

where m is the masse of vertical motion module and g is the gravitational acceleration constant.

Substituting Eq. 7, 8 and 9 into Eq. 5 gives the contact force as a function of piston displacement:

$$F_i = \frac{(P_{in} + P_a) \cdot a \cdot b}{-b \cdot X_i + a} + c \cdot X_i - d \quad (10)$$

where variables a , b , c , and d are used to simplify the equation, with

$$a = A \cdot h + V_t$$

$$b = A$$

$$c = k_s$$

$$d = F_o + m \cdot g + P_a \cdot A + k_s \cdot h$$

To achieve a given PP_s, the only remaining variable P_{in} to be set can be determined by inverting Eq. 10 and reducing it to :

$$P_{in} = \frac{[(F_i + d) - c \cdot X_i] \cdot [-b \cdot X_i + a]}{a \cdot b} - P_a \quad (11)$$

Using Eq.10 and Eq.11, K is thus expressed as:

$$K = \frac{(P_{in} + P_a) \cdot a \cdot b^2}{(a - b \cdot X_i)^2} + c \quad (12)$$

In order to simulate different stiffnesses for a given profile, a constant offset x_{off} on the target position X_i is introduced. This is physically feasible if we assume that h is larger than position X_i given by the PP_s. Figure 3 illustrates the final displacements x with and without a uniform offset x_{off} of 50 mm for $h = 100$ mm with:

$$x = X + x_{off}. \quad (13)$$

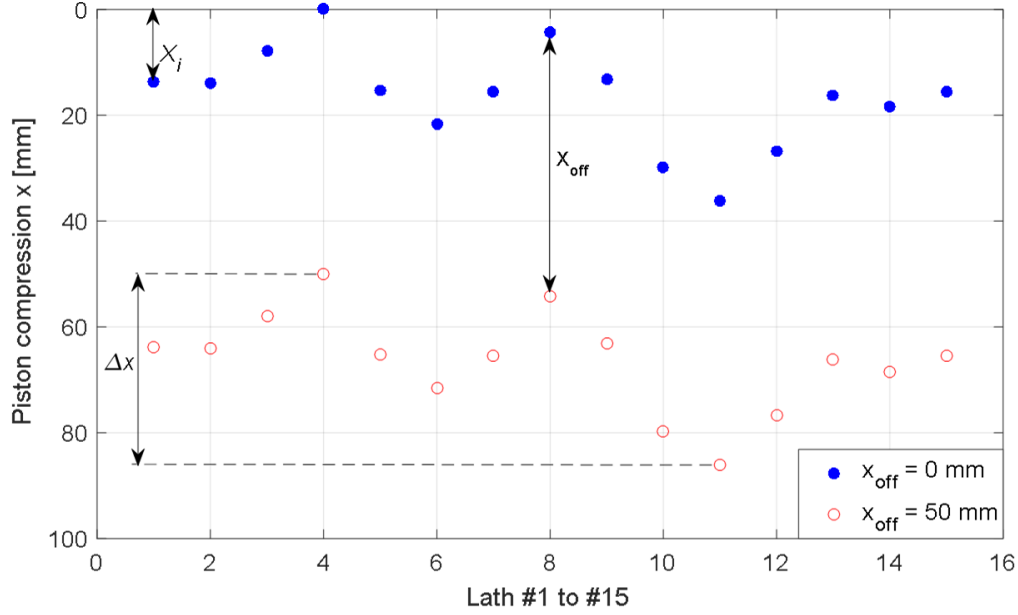


Figure 3: Two sets of piston compressions x_i for two different offsets x_{off} , with similar profile shapes

Thus, the apparent stiffness K becomes:

$$K = \frac{(P_{in} + P_a) \cdot a \cdot b^2}{[a - b \cdot (X_i + x_{off})]^2} + c \quad (14)$$

and is only function of variable x_{off} , once PP_s is defined. For a certain profile, P_{in} is a priori determined knowing inputs X_i , x_{off} and F_i and the apparent stiffness results following design parameters A , h , V_t and k_s .

5.4. Pneumatic system design

The ideal pneumatic cylinder selected for the bed simulator should provide a stiffness tuning range as large as possible for a given achievable range of cylinder pressure. Because of the nonlinear impedance nature of the pneumatic cylinder compression curve, everyone has thus a different potential stiffness tuning range specific to each lath, since the load on each lath may vary from one lath to the other. A comparative achievable stiffness range indicator ΔK is therefore used for analysis purposes, with ΔK being defined as the maximal, minus the minimal stiffness that can be achieved by a piston for given F_i and X_i values and given piston pressure limitations.

Parameters A , h , V_t , and k_s are the main ones that influence cylinder choice. For instance, A and h are limited between bounds indicated in Table 1 according, for instance, to availability of the *Bimba* cylinder product line (United States, University Park, IL, Bimba Manufacturing Company Inc.), while V_t is imposed by the space available around the cylinder connections and k_s is predetermined at 0.1204 N/mm according to an average value given in the *Bimba* product line. Other limitations such as initial piston pressure P_{in} , final pressure P_f at maximum piston compression and x_i , the piston nominal

compression must be considered for piston selection. Because the pneumatic system controls the pressure with a precision of ± 0.0069 bar (± 0.1 psi), the lowest initial pressure is intentionally limited to 0.03 bar (0.5 psi) to maintain the pressure magnitude error below 20%. Yet, a low initial pressure of 0.03 bar at initial piston volume is insufficient to raise the lathes at their maximum height due to their own weight. To that end, at low pressure levels, lathes must be raised by an external actuator if they are to be positioned at their highest level to create a larger initial volume V_{in} . The Electronic Air Pressure Control (EAPC, OMEGATM - IP610-0120) used to control the input piston pressure has a maximal regulated pressure of 4.14 bar (60 psi), slightly under the maximum requirements for 99% of the population. In fact, using a trunk mass of 102.3 kg [3], a trunk length of 57.3 cm [17] to respectively represent a 99th percentile user mass and anthropometry, the maximum steady state pressure induced by a human is 6.07 bar (88 psi). Finally, x_{off} value is limited by the difference of h and maximum profile span Δx (Fig.3). Design limitations of the pneumatic cylinder are summarized in Table 1.

Table 1: Design limitations of the pneumatic cylinder

| Data | Description | Minimum value | Maximum value |
|-------------------|---|-----------------------|------------------------|
| System parameters | Area of the cylinder (A) | 126.7 mm ² | 8107.3 mm ² |
| | Maximum piston travel range (h) | 50.8 mm | 254 mm |
| | Volume connection of the cylinder (V_t) | 5252 mm ³ | |
| | Spring constant stiffness of the pneumatic cylinder (k_s) | 0.1204 N/mm | |
| Design variables | Initial input pressure (P_{in}) | 0.03 bar (0.5 psi) | 4.14 bar (60 psi) |
| | Final pressure (P_f) | 0.03 bar (0.5 psi) | 6.07 bar (88 psi) |
| | Offset of the position (x_{off}) | 0 | $h - \Delta x$ |

Fig.4 illustrates ΔK stiffness range values computed with MATLABTM (MathWorks Corporation, Natick, MA, USA) given all limitations previously discussed. According to the graph, a small piston area A is required to guarantee a large stiffness range ΔK , with low values of piston travel range h . A convenient choice for cylinder parameters is illustrated as a dot in Figure 4. This results in a piston area of 641.3 mm² (representing a 27 mm diameter) and a maximum piston travel range of 111.1 mm.

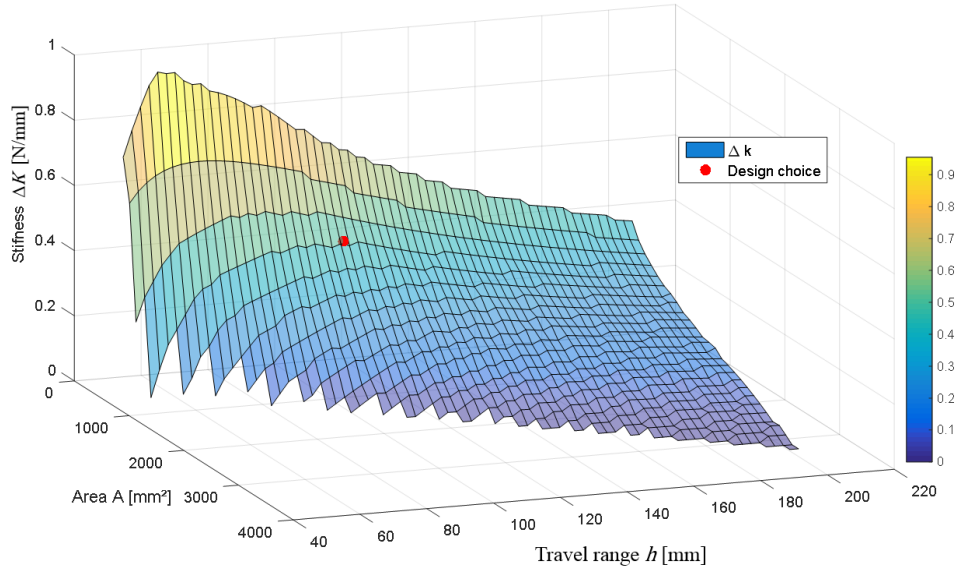


Figure 4: Average stiffness range ΔK for all lathes as a function of piston area A and travel range h

Considering Eq. 14, one can compute, for a given lath and $(F_i, X_{i,})$ value set, the required initial pressure and the resulting lath stiffness values at different x_{off} values. Results are illustrated in Fig.5. As shown, the lowest stiffness value is achieved when P_{in} is high and, at the opposite, a high stiffness value is achieved when P_{in} is low. Due to a lower bound on the Electronic Air Pressure Control of the system, the achievable stiffness range is limited to a range identified by the vertical dashed line limit indicated in the figure, corresponding to an x_{off} value of 28 mm. Given that each lath has a different $(F_i, X_{i,})$, one of the lathes will reach the lower pressure bound before the others. Consequently, it is this lath that limits the x_{off} value to 28 mm in this current design.

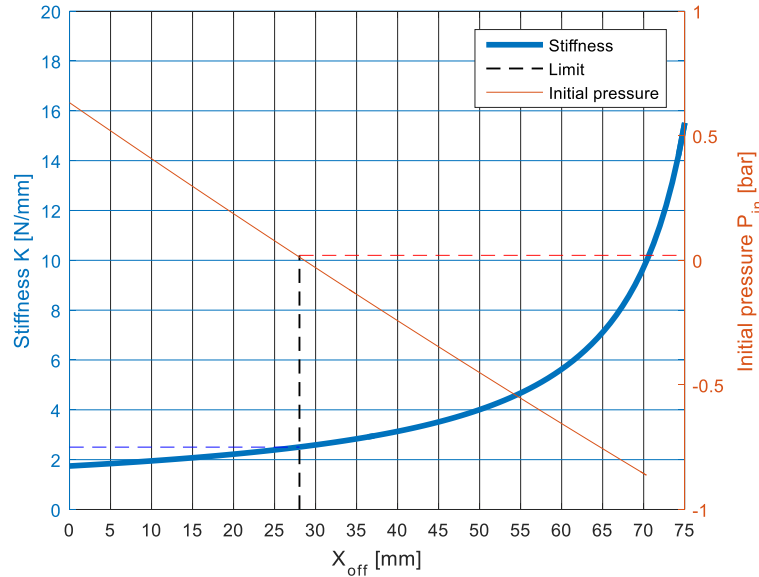


Figure 5: Example of achievable local stiffness magnitude as a function of initial piston pressure, for lath #11

Each lath has its own set of stiffness and initial pressure curves, such as those shown in Fig.5. For a PP_s set of data obtained with a 172 cm high, 58.9 kg, 26 years old man lying in a supine position, minimum and maximum stiffness and pressure values are computed for each of the 15 lathes (Fig.6). As observed, the actual stiffness range varies from one lath to the other.

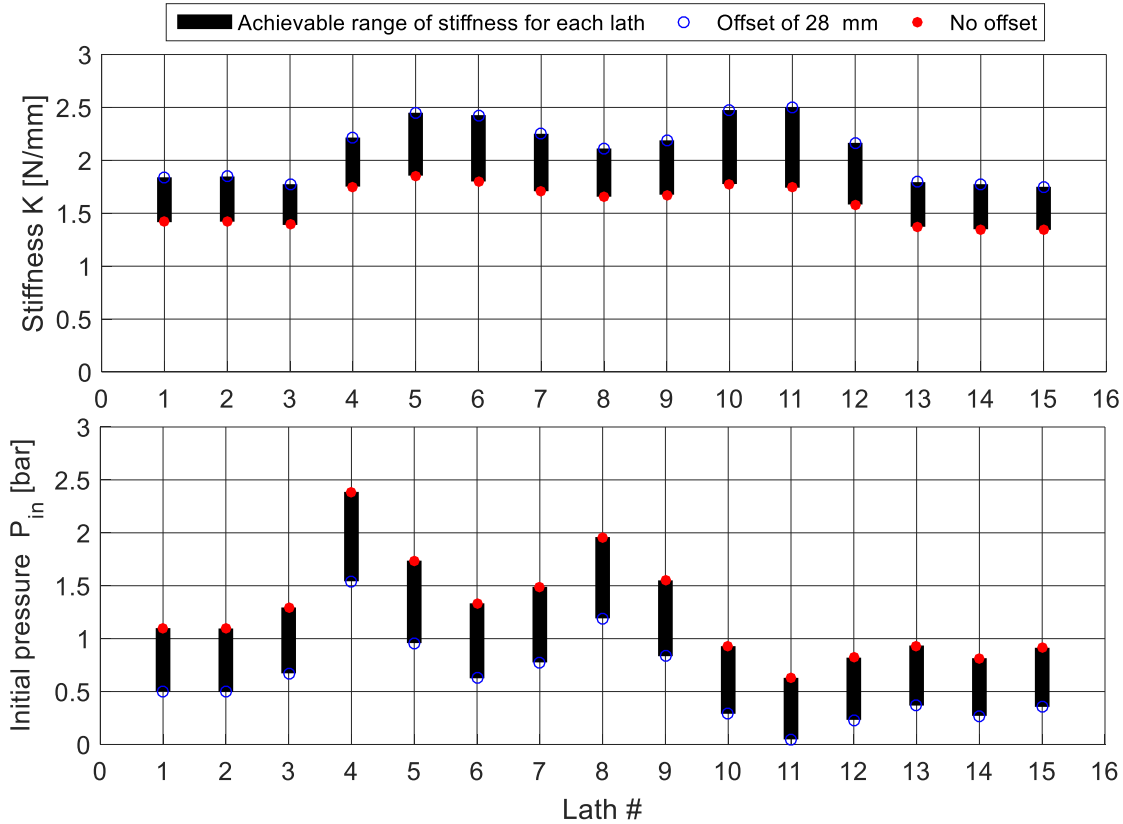


Figure 6: Achievable stiffness range and pressure range for a given PP_s , for all 15 lathes

5.4.1. Simulator components design

Simulator overall dimensions are similar to those of a standard single bed: 1837 mm long, 940 mm wide and 508 mm high. Fifteen adjacent rolling vertical motion modules compose the main structure of the simulator, as shown in Figure 7. A yellow birch plywood lath is rigidly attached to the top of each motion module to support the user. Lathes are covered by a 50 mm thick foam to smooth out the profile between adjacent lathes and improve user comfort. The same foam topper was used on the instrumented bed to obtain PP_s such that its influence on force distribution is carried on to the stiffness simulator. The pneumatic cylinders are inserted within the motion modules and the pneumatic control system regulates their P_{in} .



Figure 7: Bed mattress simulator design with foam topper and user

5.4.2. Vertical motion module

The module contains the lath, the pneumatic cylinder, a custom aluminum extrusion supported by eight rollers, and a wood cage (Fig.8).

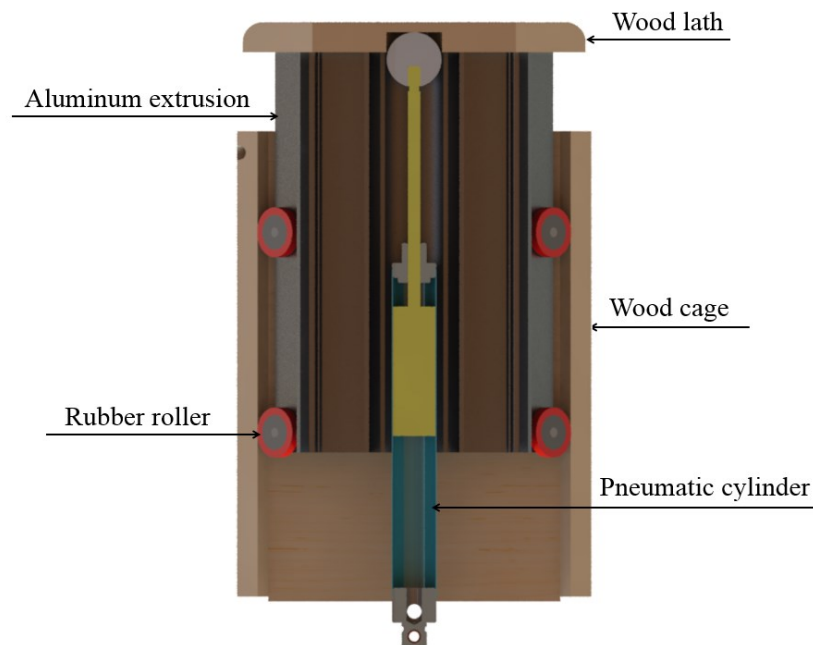


Figure 8: Cross section of the vertical motion module of the simulator

Minimizing design space to a central vertical guide allows more room for mechatronic components, wires and pneumatic tubing management around the simulator. It also distributes the load on a single actuator per lath and it also prevents the user from falling down the bed, by leveling the lath whatever the user position is. The lath is firmly attached to the extrusion and simply inserted in the cage, while the pneumatic cylinder and the wood cage are fixed to the simulator base.

When the lath pushes down the piston extremity, its vertical motion is constrained by two stages of four precision rollers positioned at 45° from a front plane, that roll inside and against the wood cage. Roller size is designed in such a way so as to make a trade-off between a low rolling resistance and the occurrence of gaps with the wood cage. They are secured to the aluminum extrusion via shoulder screws inserted in holes machined with a ± 0.03 mm precision by a four-axis milling machine. Rollers are made of polyurethane coated bearings (grade 90A) and are circumferentially machined with a lathe at a precision of ± 0.1 mm. Using a trial and error approach, the nominal diameter of the rollers (31.75 mm) was increased by 0.3 mm to find a good balance between guaranteed contact and reduced rolling resistance.

5.4.3 Pneumatic control system

The pneumatic control system controls the initial pressure P_{in} in each individual cylinder in order to control F and X when a user is lying on it. The embedded system is directly located in an electric box on the simulator (Fig.9).

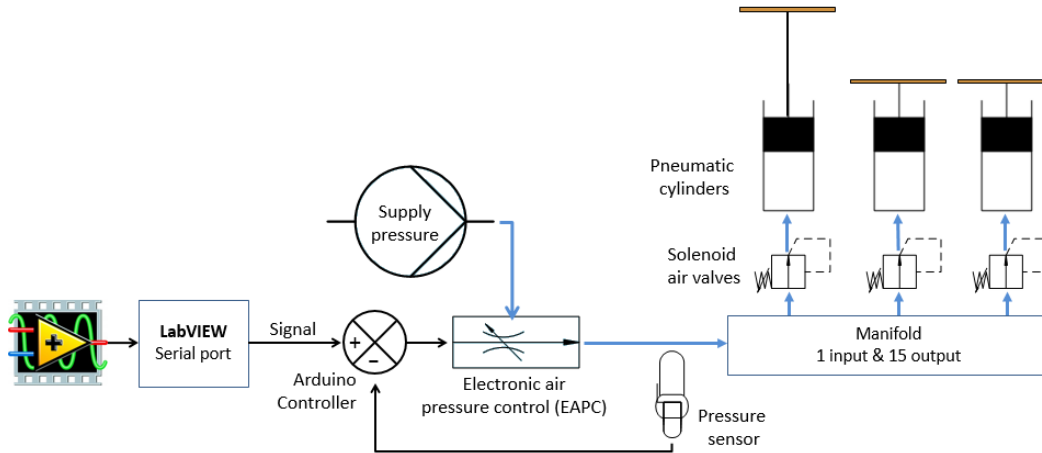


Figure 9: Schematic of the simulator pneumatic embedded system

Individual cylinder pressure commands are digitally sent via a serial port to an Arduino Controller (Mega 2560) using a LabView interface. Then, an onboard proportional and integral control programmed in the Arduino outputs an analogical signal to the Electronic Air Pressure Control (EAPC, OMEGA™ - IP610-0120) based on a feedback from a pressure sensor (TE Connectivity – M3031-000005-100PG) to regulate the supply pressure provided by the building infrastructure at 6.89 bar. The pressure sensor is connected to the EAPC, which regulates the gauge pressure between 0 to 4.14 bar (60 psi). The controlled pressure is distributed via a manifold and each pneumatic cylinder (Bimba - 094.375-PBY) has one associated solenoid relief valve (2ACK-1/4-12VDC-G) controlled (open or closed) by the Arduino to select the lath whose pressure must be adjusted.

5.5 Experimental method for simulator characterization

Actual force-displacement curves were measured on lath #6 with a single axis traction machine, to determine if theoretical predictions for motion module stiffness matched to the one obtained experimentally. Lath #6 is approximately located above the user's trunk. These tests allowed us to determine both the PP_s model accuracy and the apparent stiffness repeatability (K) of the simulator for different initial pressures, and piston displacements and velocities. Fig.10 illustrates the experimental apparatus components used to test the pneumatic cylinder system.

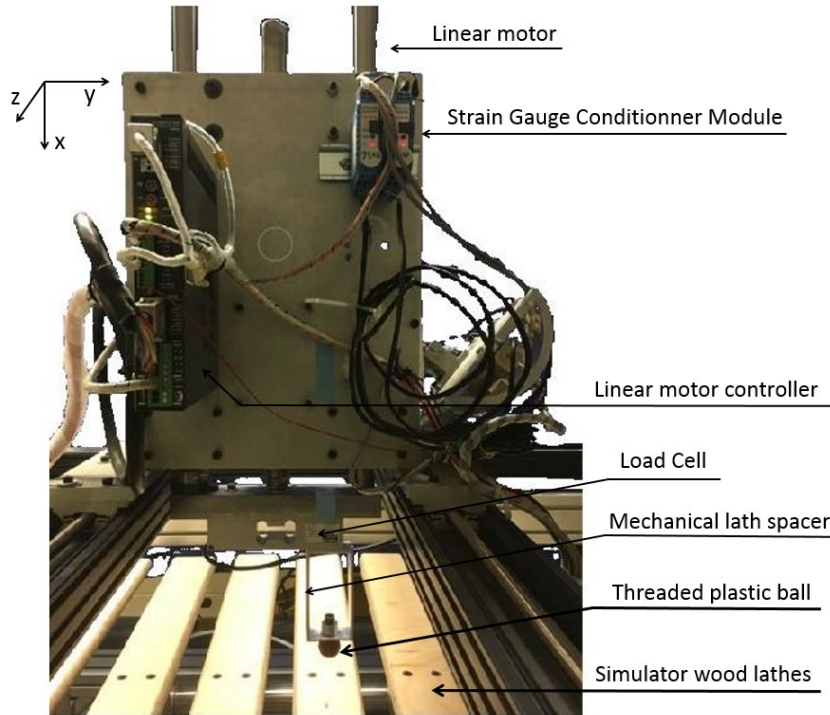


Figure 10: Schematic view of the experimental apparatus components for system characterization

The impact of four different variables was studied: piston compression (x), initial pressure (P_{in}), compression velocity and sudden acceleration at a constant rate of 1 m/s^2 . A load cell (Tedea-Huntleigh - Model 1042) was used to measure the compression force, along with a strain gauge conditioner module (InterTechnology Inc. - SGCM-401). A two-axis positioning table was located on the testing platform over the desired contact point on the lathe. A linear motor (LinMot PF01 - 48x240) controlled the vertical movement of the load cell along the x axis (vertical), with a $\pm 0.004 \text{ mm}$ precision. LabVIEW (National Instruments) was used as a control interface to manage the testing procedure. Once the testing platform was located at the center of the lath, the lath was raised to its maximal height and the EAPC system set the initial pressure inside the cylinder. The linear motor then compressed the lath downward and the reaction force was recorded at 50 Hz using the load cell.

Compression tests were also performed on the pneumatic cylinder alone, and on the motion module without cylinder. These tests were later used to determine the contribution of each component to the total passive resisting force of the motion module. Different connectors were used depending of the specific setup tested (Fig.11).

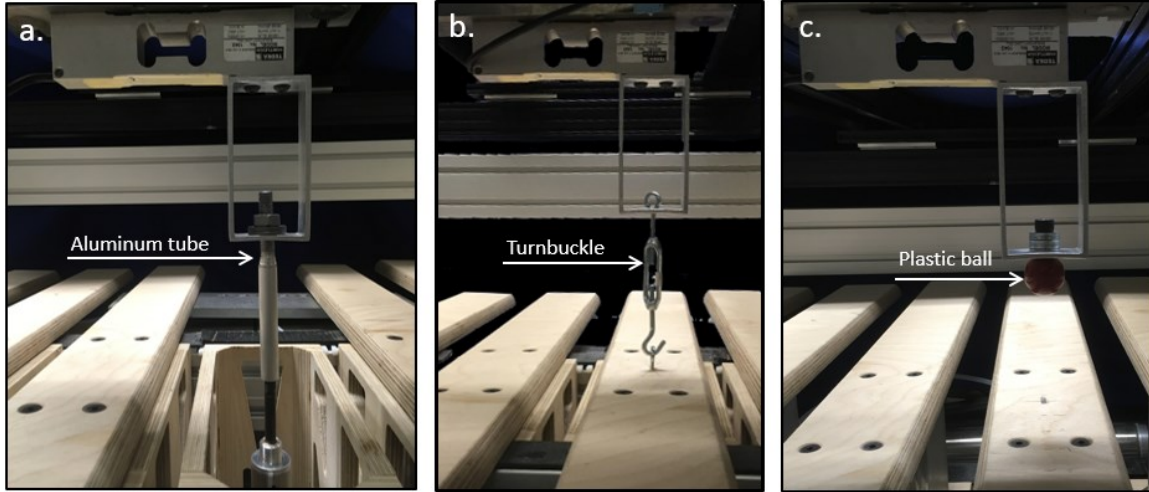


Figure 11: Different configurations to test the pneumatic cylinder and the vertical motion module without and with a suspension at different input pressures. a. pulling of the cylinder (aluminum tube), b. pulling of the vertical motion module (turnbuckle) without suspension. c. pushing of the lath (plastic ball) with the suspension

5.5.1 Position steady state characterization

Tests were conducted on a typical lath (# 6), with initial pressure set to 0.70, 1.03, 1.38, 1.72, 2.07 or 2.41 bar. The lath static mechanical impedance was then characterized over its whole vertical range, starting from the top, as compressing the lath, or from the bottom, referred to as relaxing the lath. The impedance curve was characterized at eight different positions (8.3, 16.6, 24.9, 33.2, 41.5, 49.8, 58.1 and 66.4 mm from the top) for each pressure level and for five repetitions. The specific protocol used was to compress the lath to the multiple positions in ascending order, stopping for 30 seconds at each position, and then relaxing the lath by stopping again at each position, in descending order.

5.5.2 Dynamic characterization

The apparent stiffness of the lath at different operating compression levels x was also tested to determine how the system behaves when departing with minor displacements. In fact, assuming the lath located is at (F_i, X_i) , the user may sometimes vary his body segment contact force on the mattress or raise it upward, to the top. When neglecting dissipative forces, the apparent stiffness from pushing or relaxing the lath from the x_i coordinate, is assumed to be theoretically the same. Considering small displacements of body segments, the model is linearized around the operating position. For a pneumatic accumulator system, the linearized assumption is valid when considering a volume variation of ± 10 percent [18]. In this case, a ± 10 percent gas volume corresponds to about 11 mm in lath vertical motion. With the aim of designing a tunable stiffness mattress simulator, experimental

apparent stiffness is tested for the minimum and maximum stiffnesses for the PP_s given and for each lath. The experimental procedure involved pushing and relaxing the lath at 20 mm/s on a 10 mm range, with 30 seconds of waiting time between the two motion sequences.

5.6 Results

5.6.1 Static equilibrium results

The compression force recorded throughout the test for various piston displacements is illustrated in Fig.12, for both compression and relaxation tests. A relaxation behavior is observed at every step, stabilizing well within the 30 s steady state delay chosen for the test. It can be seen, as well, that steady state force magnitudes are not equal on the compression sequence vs the relaxation sequence, the difference being more noticeable at higher compression levels. That difference is better illustrated by plotting the compression force versus the piston compression x , as shown in Fig.13. Data are shown for lath #6, at 1.38 bar initial pressure. Black dots represent the steady state value reached at each piston position. Compressing the lath results in higher contact forces due to the presence of static and dynamic friction forces inherent to the system. The small peaks at each position when initiating a piston movement are related to the static friction properties of the system.

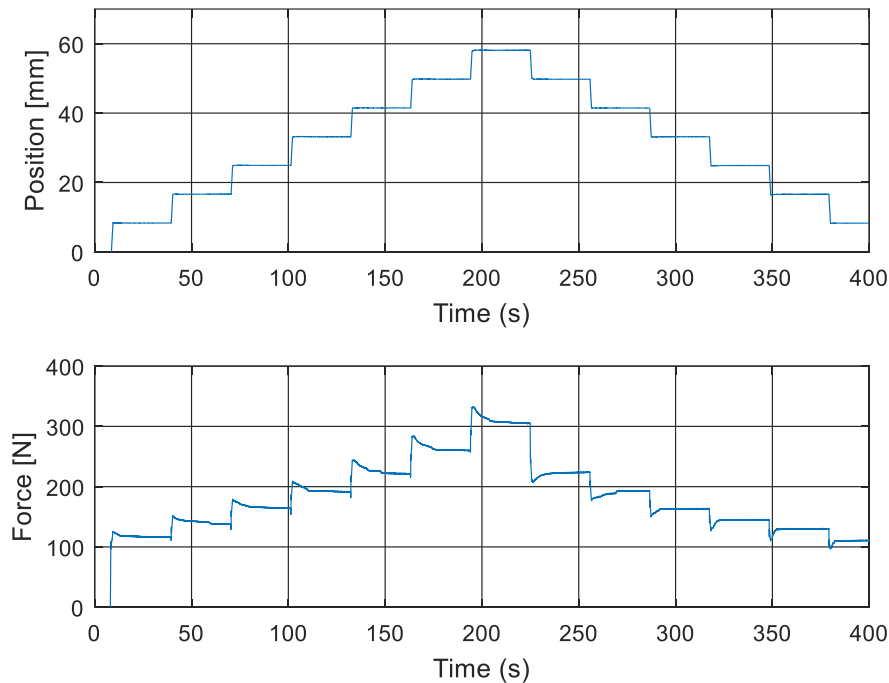


Figure 12: Static equilibrium characterization method for lath #6, at 1.38 bar initial pressure

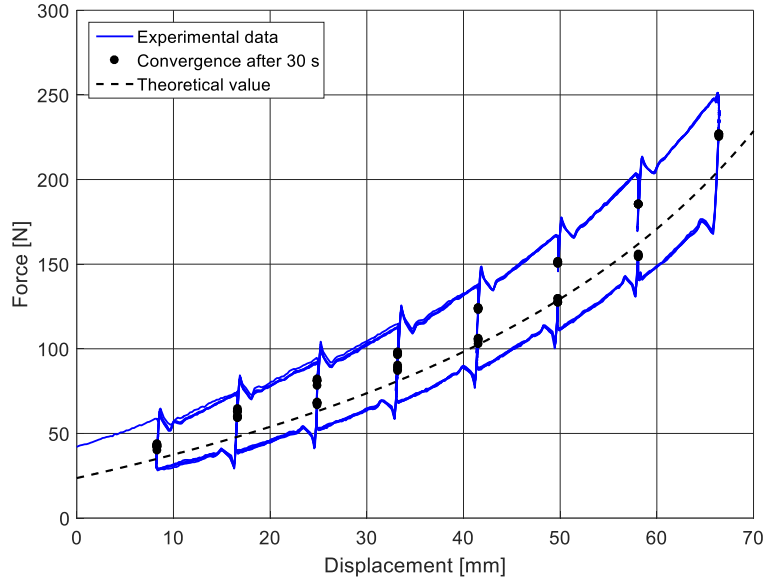


Figure 13: Convergence of the steady state force magnitude by compressing or relaxing the lath

The mean force value for both the steady state compressing and relaxing conditions was computed for each piston position. The same process was performed for various initial pressure magnitudes ranging from 0.69 to 2.41 bar. Overall results were combined in a three-dimensional plot that relates three variables that define a test condition, namely, F , X and P_{in} (Fig.14). A surface defined by Eq.10 was then fitted to the experimental data to get the best fit parameters a , b , and d . Parameter c has known since it is the stiffness constant k_s of the cylinder spring which was experimentally found by performing a traction test on the cylinder at gauge pressure. It was found that c is about the same value as that stated by the manufacturer, i.e. 0.1219 N/mm. The spring is also pre-stretched such that a threshold extension force value of 13.1 N is required before the piston can be extended. Parameters a , b , and d were found by using a nonlinear programming solver (Levenberg-Marquardt) available on MATLAB. For these given parameter values, Eq.10 provides a fitted three-dimensional surface shown in Figure .

Fitted parameters a , b and d are listed in Table 2 and compared to theoretical values, showing a good correspondence within 9 %. Therefore, the theoretical model for the mattress simulator provides a mean to determine the required P_{in} for different piston positions and force levels.

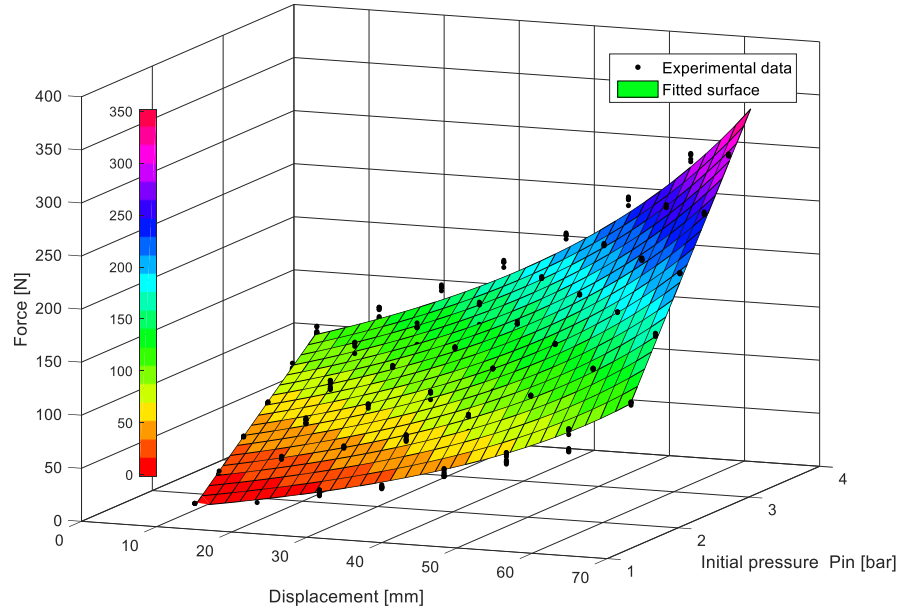


Figure 14: Experimental results of mean values of the static equilibrium tests for various P_{in} and position displacements for lath #6

Table 2 : Static equilibrium fitted parameters

| | a | b | c | d |
|-------------------|------------|--------|--------|--------|
| Fitted parameters | 7.4786e+04 | 613.55 | 0.1219 | 116.30 |
| Theoretical | 6.8843e+04 | 577.42 | 0.1219 | 114.47 |
| Deviation (%) | 9 % | 6% | 0% | 2% |

However, data from Fig.13 clearly shows that the piston behavior varies slightly from theory. Differences in contact forces between compressing and relaxing conditions induce a bias ΔF_s in the prediction force for the final configuration reached when a user lies on the simulator. Over the whole surface illustrated in Figure 14, the relative bias error $\Delta F_s / \bar{F}_s$ is in the order of 12%, whereas ΔF_s is the mean difference between the compressing and the relaxing force at each piston position, and \bar{F}_s is the mean value at each piston position for a specific pressure level. The relative bias error translates into a bias piston position in the order of 6 mm for the PP_s previously described and experimental parameters identified above (cf. Table 2).

5.6.2 Dynamic results

Assuming a user is lying on the mattress with a given PP_s , anybody reconfiguration would likely change lath positions and contact forces. These variations are determined by the lathes local apparent stiffnesses K . The local stiffness was characterized for lath #6, by pushing the lath at 20 mm/s over 10 mm, then waiting 30s, before relaxing over the same

distance at the same speed. The resulting force-displacement curve of the piston is shown in Fig.15, for both compressing (shown on Fig.15 as the curve above the theoretical curve) and relaxing movements (shown on Fig.15 as the curve below the theoretical curve).

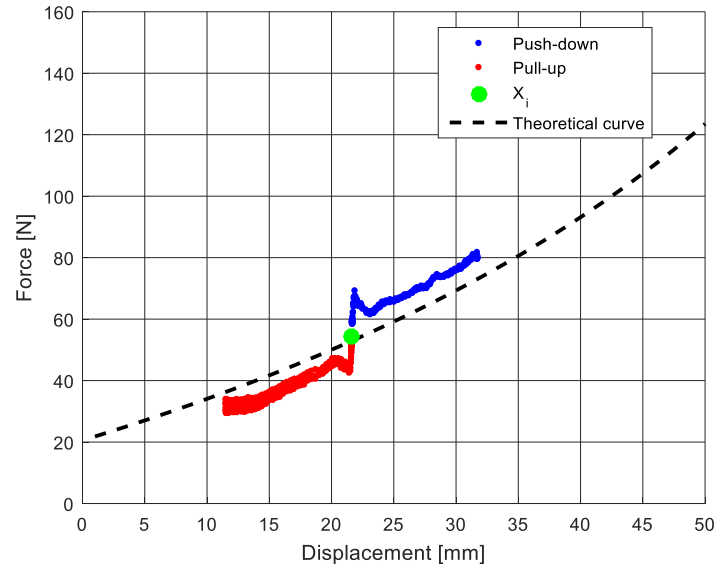


Figure 15: Dynamic behavior characterization of lath #6, at a personalized compression of 21.6 mm

Slopes can be computed on both compression results or relaxing results to estimate local stiffness for a given lath configuration (F_i , X_i). The same tests and computations were performed for all 15 lathes and stiffness values were compared to theoretical values obtained from Eq.14. Data are shown for all lathes in Fig.16, at two different piston offsets, 0 mm and 28 mm, corresponding to the two different extremes of initial pressure levels (maximum and minimum available).

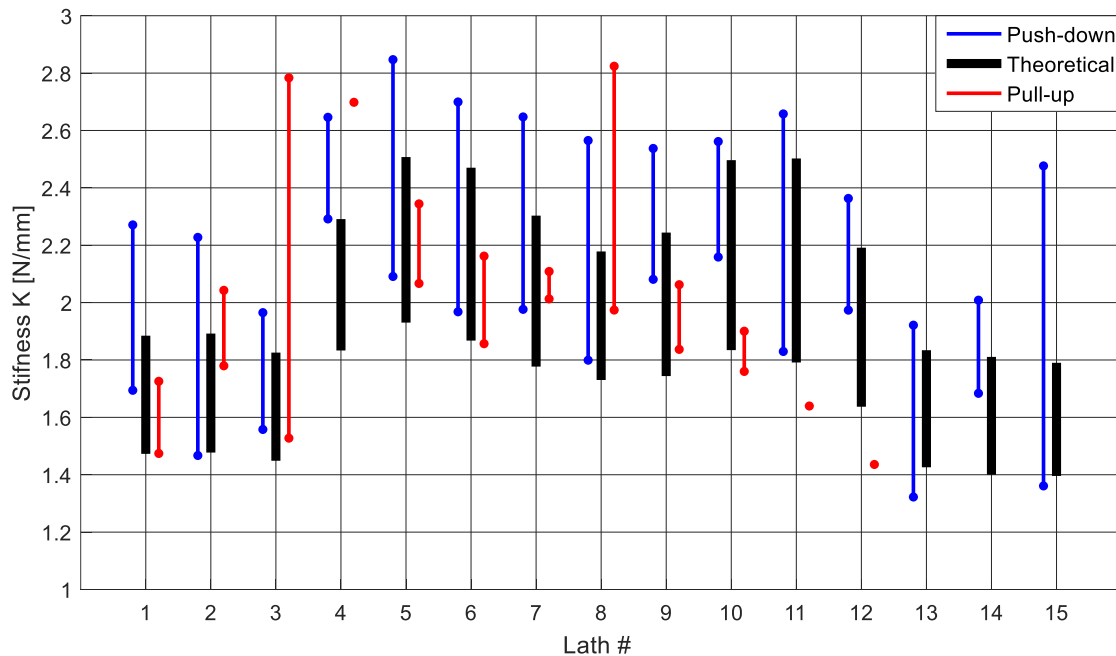


Figure 16: Experimental results of the dynamic behavior of each lath during push-down and pull-up

Results clearly indicate differences between the push-down behavior (to every left of the theoretical bar), pull-up behavior (in red to every right of the theoretical curve) and theoretical stiffness, for either piston offset configurations. As shown in the Fig.16, the simulator is able to regulate apparent local stiffness over a significant range, averaging 0.609 N/mm across all 15 lathes for the push down direction. In the pull-up direction, although some of the lathes (# 1, 2, 3, 5, 6 and 8) experienced similar responses, others (# 11, 12, 13, 14 and 15) did not show significant variations in local stiffness and, even, no local spring-like behavior at all, due to the presence of stiction forces that were higher than pneumatic forces. Finally, lath #4 did not show any spring-like behavior in the pull-up direction since its initial position was already at the piston zero compression value.

5.6.3 Friction force magnitude

As vertical motion module's friction has a main impact on the force-displacement curve hysteresis observed (Fig.13), further investigations were conducted to determine the origin of the friction forces. Friction is caused by both the pneumatic cylinder friction force (F_c) and the resistance to rolling of the motion module (F_r) such that the total friction force of the vertical motion module F_f is assumed to be given by:

$$F_f = F_c + F_r. \quad (21)$$

The contribution of each force was characterized experimentally by recording force-displacement curves of the vertical motion module without piston (Fig.17 a.), and the piston alone at 1.03 bar (Fig.17 b.). Tests were conducted at 10 mm/s between 10 to 54 mm piston displacement, in both compression and relaxing modes. Computing half of the force average difference between both curves lead to a rolling resistance of about 2.6 N, whereas the piston induces around 15 N friction force, for a total dynamic friction force in the order of 18 N, which happens to be higher than the pneumatic force provided by the piston for lathes # 13, 14 and 15. Expected pneumatic forces for lathes #11 and 12 were not well beyond this level (25.2 and 24.5 N respectively).

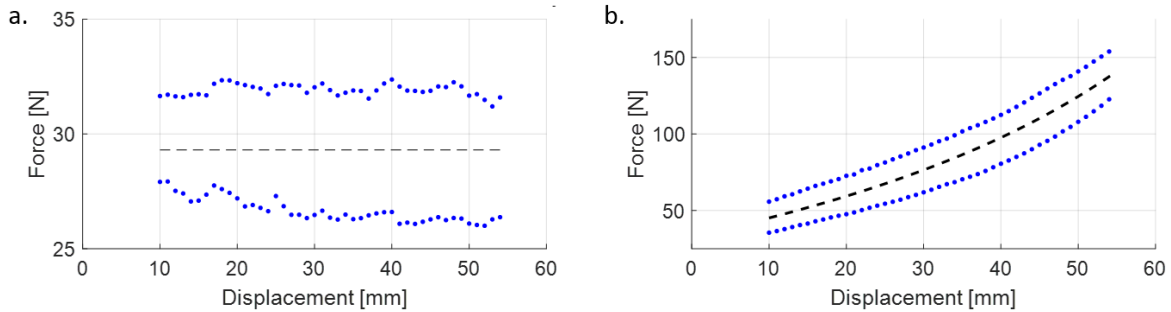


Figure 17: Independent characterization of motion module and piston friction properties. a. Rolling resistance of the rollers (F_r), b. Pneumatic piston (F_c).

5.6.4 Impact of piston velocity on friction

Friction was further characterized at different piston velocities, ranging from 1 to 40 mm/s, at 1.03 bar initial pressure. Tests were also performed for the vertical motion module but rolling resistance did not change by much with module velocity. Energy losses were

computed for a single testing cycle (compression– relaxation), as the hysteresis response area of the force-displacement curve. Results are shown in Fig.18, for the various velocities tested. Losses are slightly higher at low velocities, stabilizing at about 11 mm/s.

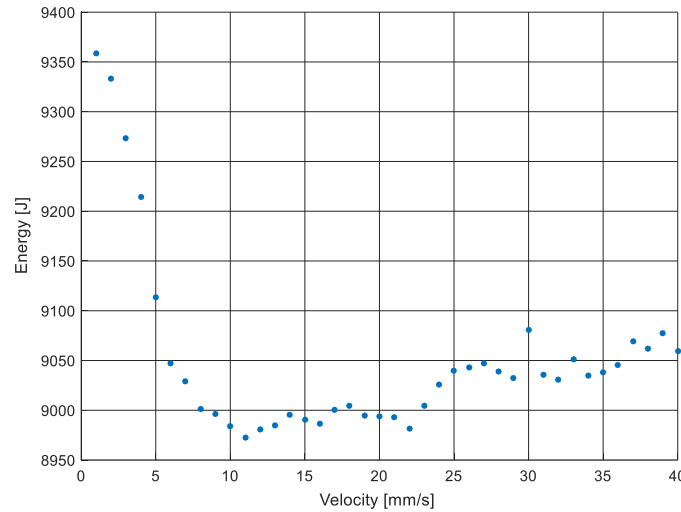


Figure 18: Friction losses during a single cycle for various motion speeds, at 1.03 bar initial pressure

Looking at the force-displacements curves, it is worth noting that the curve orientation slightly shifts upward or counter-clockwise with piston velocity (Fig.19).

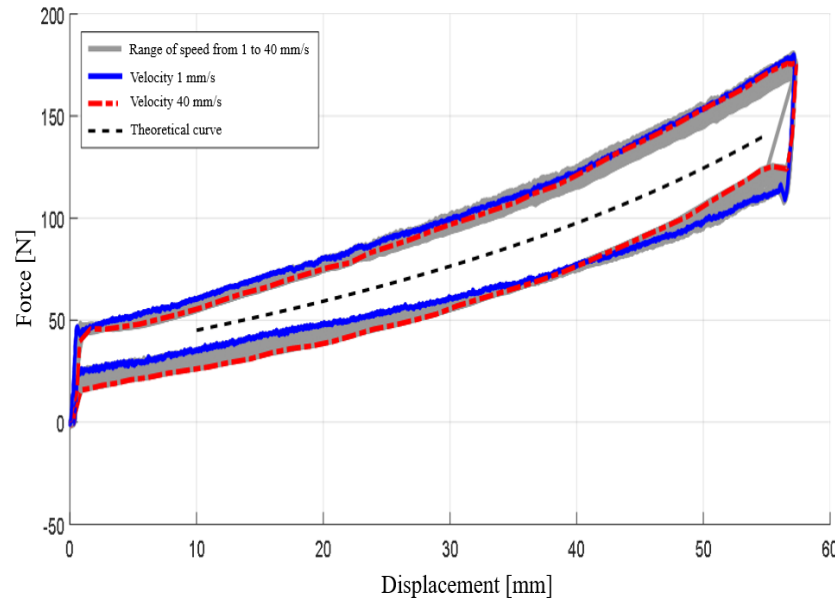


Figure 19: Force-displacement hysteresis curve for 1 to 40 mm/s, at 1.03 bar initial pressure

5.6.5 Preliminary investigation of non-local memory on friction

Finally, friction properties were also evaluated for various time motion history of the piston. To that end, friction was tested and compared when the piston of lath #6 followed a path illustrated in Fig.20a, at 20 mm/s. A non-symmetric path is followed from 1 to 18.3 s

(trial #1), and the same path is repeated from 18.4 to 33.6 s (trial #2), thus changing the previous motion history of the piston at a given position. The resulting force time response and force-displacement piston curves are respectively shown in Fig.20b and Fig.20c. Local tangent stiffness can be computed every time the piston goes through position 21.6 mm, over a ± 10 mm range, for a total of 12 different stiffness estimates. Results are listed in Table 5.

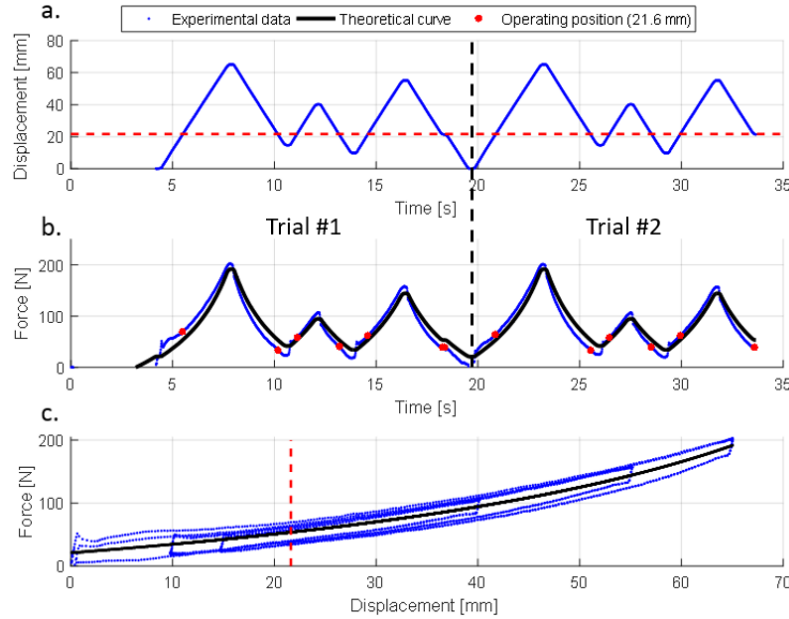


Figure 20: Non-local memory results showing a. two trials of a certain path, displacement as a function of time, b. resulting force-time response, c. piston force-displacement curves.

Table 3: Local tangent stiffness at X_i equals to 21.6 mm, for lath #6 at 1.31 bar input pressure

| | | | | | | | |
|---------|----------|------|------|------|------|------|------|
| Trial 1 | t (s) | 5.5 | 10.2 | 11.1 | 13.2 | 14.6 | 18.3 |
| | K (N/mm) | 1.71 | 1.77 | 2.71 | 2.11 | 1.96 | 1.78 |
| Trial 2 | t (s) | 20.9 | 25.5 | 26.5 | 28.5 | 29.9 | 33.6 |
| | K (N/mm) | 1.96 | 1.64 | 2.73 | 2.02 | 2.01 | 1.76 |

According to Table 3, the average difference between stiffness estimates for the two trials is 0.09, which indicates good repeatability and stability in stiffness. However, estimates vary significantly over time along the piston path, (from 1.64 to 2.73 N/mm), corresponding to 94% of the nominal stiffness desired for the Personalized Profile (PP).

5.7 Discussion

Most authors agree that optimal comfort in lying position is reached when the body is on a *Static Personalize Profile* (PP_s). Moreover, mattress stiffness should also be optimized to account for user movements during sleeping time. The following paragraphs discuss to what extent the simulator can reach the PP_s while tuning the stiffness independently. The use of a pneumatic mechanism leads to many mechanical issues.

Results from static equilibrium tests (Fig.13 and Fig.14) show that for the specific pneumatic piston-base system developed, simulator force-displacement curve trends are close to theoretical predictions, within 9%, making it thus possible to adjust the simulator to PP_s requirements. The simulator can experimentally offer force static equilibrium repeatability within 12 %. For the given PP_s of a 172 cm high, 58.9 kg, 26 years old man lying in a supine position, the equivalent displacement static equilibrium bias error is around ± 6 mm. Errors on PP_s performance are likely caused by pistons having a time relaxation behavior set for a limited time period, in the order of 10 s (Fig.12), and nonlinearity in mechanical behavior depending upon lath direction. The impact of time dependent surface characteristics should be further investigated in sleeping studies because it might reveal itself when a subject move during the sleeping phase.

Nevertheless, with the ± 6 mm bias error, the maximum separation between two lathes would double, reaching 12 mm. This difference would a priori be unacceptable to guarantee a given PP_s . However, during usage, it is expected that much smaller lath separations would occur because humans are continuous systems that can transfer forces between body segments, thereby reducing wide variations between two consecutive lathes.

Results also show that the direction of piston displacement affects the reaction force on the lath, most likely due to friction forces. Knowledge of lath motion direction would significantly decrease the displacement static equilibrium error to 1.47 mm or 2.15 mm, when respectively compressing or relaxing the lath. Although this bias could be eliminated through detailed system modelling, it would require constant monitoring of piston displacement direction.

Apart from adjusting piston input pressure, an overall surface offset x_{off} can be used to adjust the overall surface stiffness (Fig.3). That adjustment, however, because of the specific PP_s and design used, is not independent across the lathes. The simulator can experimentally offer stiffness values from 1.322 to 2.847 N/mm (Fig.6). Yet, the local tangent stiffness tuning is applied individually from one lath to the next and can reach 0.609 N/mm on average. Resulting stiffness levels are yet influenced by many factors such as user reconfiguration direction, friction forces, velocities and previous piston motion history.

While reconfiguration direction is not only important for correctly adjusting the lathes to the required PP_s values, it also has an impact on the apparent local stiffness K where results show that it varies noticeably when the piston is compressing, versus relaxing (Fig.16). When compressing the lathes, it is possible to achieve a reasonable tunable stiffness range, but relaxing the lathes makes it more difficult, due to stiction forces that inhibit lath motion.

Although roller resistance was successfully reduced to only 2,6 N, data show that piston friction is in the order of 18 N and has a significant impact on the simulator ability to create

the desired PP_s and K values, especially for lathes that have lower X_i requirements. Low friction pistons should ideally be used to mitigate this mechanical issue.

Finally, it was found that several well-known issues with the use of pneumatic pistons were also observed in the simulator. For instance, velocity dependent friction and piston displacement history both affect the lathe reaction force. These issues are well documented in many references [17–20].

The impact of piston velocity (Fig.19) on tangent stiffness is much larger for higher velocities because of a shifting hysteresis phenomenon. As an example, for lath #1 of the PP_s at 16.78 mm and 1.03 bar, the stiffness is 0.470 N/mm higher at 40 mm/s than at 1 mm/s, which represents 77% of the simulator stiffness tuning range. However, human reconfiguration on a bed surface probably induces surface motion magnitudes in the order of 20 mm/s to 40 mm/s. The stiffness range variation, for this velocity difference, is only 0.025 N/m, which now represents only 5% of the stiffness tuning range.

Although our investigation showed that local memory (Fig.20) can significantly bias simulator stiffness (on up to 94% of the simulator tuning range), it may not have practical implications for normal usage. Such physical phenomena were described in the past [19]. It should be noted that only one path and two trials have been tested on the system. Further testing may be needed to increase confidence in the results.

5.8 Conclusion

In this paper, a bed simulator that can almost guarantee a *Static Personalized Profile* was proposed, i.e. body segment reaction forces on the mattress within 12%, and body segment equilibrium positions of a user within 6 mm on a lath, for a given user. At the same time, the simulator can control the tangent stiffness independently, to ensure a better customer experience and restorative sleep. The simulator is composed of 15 individual sections controlled by a pneumatic mechanical suspension. It is designed to get a potential stiffness tuning range, from 1.322 to 2.847 N/mm. For further improvements, it would be helpful to mitigate friction issues by incorporating a closed-loop control system on the pneumatic system, thereby regulating the final pressure in real time, instead of doing it through initial pressure monitoring.

Future qualitative tests with participants on the simulator would help to determine what are the desired stiffness properties (magnitude, direction) of a mattress surface to achieve maximal surface comfort.

5.9 Acknowledgment & funding

The authors would like to thank the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) for the partial financing of this research project, as well as Matelas René Inc for their technical contributions and the financial funds granted for this project. Special thanks to Sebastien Harvey for his help in machining parts of the mattress.

5.10 References

- [1] Z. Lei, Y. Qiongjing, W. Qiuli, K. Sabrina, L. Xiaojing, and W. Changli, "Sleep quality and sleep disturbing factors of inpatients in a Chinese general hospital," *J. Clin. Nurs.*, vol. 18, no. 17, pp. 2521–2529, Sep. 2009.
- [2] B. H. Jacobson, T. J. Wallace, D. B. Smith, and T. Kolb, "Groupes comparisons of sleep quality for new and personal bedding systems," *Appl. Ergon.*, 2007.
- [3] D. A. Winter, *Biomechanics and motor control of human movement*, 4th ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2009.
- [4] B. Haex, *Back and Bed: Ergonomic Aspects of Sleeping*. CRC Press, 2004.
- [5] B. Haex, J. V. Sloten, and R. V. Audekercke, "Required stiffness distribution in a mattress for an optimal curvature of the human spine during bedrest," in *Proceedings of 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 1996, vol. 2, pp. 495–496 vol.2.
- [6] J. W. DeVocht, D. G. Wilder, E. R. Bandstra, and K. F. Spratt, "Biomechanical evaluation of four different mattresses," *Appl. Ergon.*, vol. 37, no. 3, pp. 297–304, May 2006.
- [7] V. Verhaert *et al.*, "Ergonomics in bed design: the effect of spinal alignment on sleep parameters," *Ergonomics*, vol. 54, no. 2, pp. 169–178, Feb. 2011.
- [8] P. Buckle and A. Fernandes, "Mattress evaluation—assessment of contact pressure, comfort and discomfort," *Appl. Ergon.*, vol. 29, no. 1, pp. 35–39, Feb. 1998.
- [9] T. Defloor, "The effect of position and mattress on interface pressure," *Appl. Nurs. Res.*, vol. 13, no. 1, pp. 2–11, Feb. 2000.
- [10] M. C. Normand *et al.*, "Biomechanical effects of a lumbar support in a mattress," *J. Can. Chiropr. Assoc.*, vol. 49, no. 2, pp. 96–101, Jun. 2005.
- [11] M. Denninger, F. Martel, and D. Rancourt, "A single step process to design a custom mattress that relieves trunk shear forces," *Int. J. Mech. Mater. Des.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–16, Mar. 2011.
- [12] M. Aoi, K. Hashimoto, M. Uemae, H. Yoshida, and M. Kamijo, "Evaluation of Sleeping Comfort of Bed Mattresses with Different Elastic Moduli for Each Body Region," *Int. J. Affect. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 111–118, 2015.

- [13] S. J. Park, J. S. Kim, and C.-B. Kim, "Comfort evaluation and bed adjustment according to sleeping positions," *Hum. Factors Ergon. Manuf. Serv. Ind.*, vol. 19, no. 2, pp. 145–157, Mar. 2009.
- [14] S. Zhong, L. Shen, L. Zhou, and Z. Guan, "Predict human body indentation lying on a spring mattress using a neural network approach," *Proc. Inst. Mech. Eng. [H]*, vol. 228, no. 8, pp. 787–799, Aug. 2014.
- [15] S. Chiba *et al.*, "High rebound mattress toppers facilitate core body temperature drop and enhance deep sleep in the initial phase of nocturnal sleep," *PLOS ONE*, vol. 13, no. 6, p. e0197521, Jun. 2018.
- [16] D. W.-C. Wong, Y. Wang, J. Lin, Q. Tan, T. L.-W. Chen, and M. Zhang, "Sleeping mattress determinants and evaluation: a biomechanical review and critique," *PeerJ*, vol. 7, p. e6364, Jan. 2019.
- [17] C. C. Gordon, C. L. Blackwell, and B. Bradtmiller, "Anthropometric survey of U.S. army personnel: Methods and summary statistics," Massachusetts, U.S army Natick Soldier Research, Development and Engineering Center Natick 01760–2642, Dec. 2014.
- [18] A. Pourmovahed and D. R. Otis, "Effects of Thermal Damping on the Dynamic Response of a Hydraulic Motor-Accumulator System," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 106, no. 1, p. 21, 1984.
- [19] B. M. Y. Nouri, "Friction identification in mechatronic systems," *ISA Trans.*, vol. 43, no. 2, pp. 205–216, Apr. 2004.
- [20] M. Wesley Machado Cunico and J. Desiree Medeiros Cavaleiro, "Analysis and optimization of the effects of frictional and viscous dampers on dynamical systems," *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control*, p. 146134841882151, Jan. 2019.
- [21] G. Belforte, G. Mattiazzo, S. Mauro, and L. R. Tokashiki, "Measurement of friction force in pneumatic cylinders," *Tribotest*, vol. 10, no. 1, pp. 33–48, 2003.

CHAPITRE VI

RECOMMANDATIONS AU CLIENT

Pour l'entreprise Matelas René, plusieurs critères sont essentiels à une réussite commerciale soit, le coût et la gestion des risques tout en assurant la durabilité du produit. Ce chapitre explique, entre autres, ces deux critères. Par la suite, une discussion résumant les apprentissages du projet est abordée.

6.1. Coût du prototype

Le coût total du prototype est d'environ 8 400 \$, soit 3 400 \$ (68 %) de plus que le montant budgété de 5000\$. Les coûts de chaque système ont été comparés afin d'identifier le système le plus coûteux pour ensuite formuler des recommandations appropriées à Matelas René (Table 6-1, Figure 6-1).

Table 6-1 : Table de coût unitaire des systèmes de l'outil de mesure

| Système | Coût unitaire | Pourcentage |
|----------------------|---------------|-------------|
| Guidage | 1 875,99 \$ | 22,33% |
| Suspension | 1 562,74 \$ | 18,60% |
| Mécatronique | 1 356,83 \$ | 16,15% |
| Structure | 1 273,80 \$ | 15,16% |
| Pneumatique | 1 188,65 \$ | 14,15% |
| Rail linéaire | 1 142,34 \$ | 13,60% |
| Total général | 8 400,34 \$ | 100,00% |

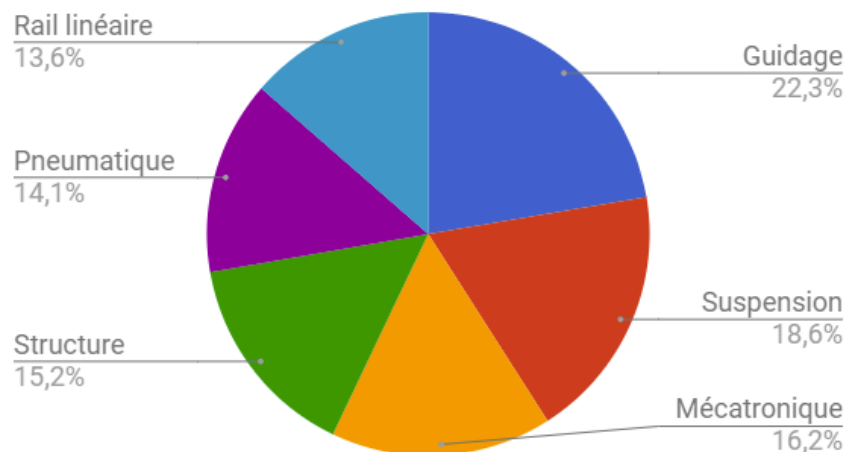


Figure 6-1 : Représentation du diagramme en camembert du coût du prototype par système

Les quatre systèmes principaux sont présentés dans le diagramme en camembert. Deux sous-systèmes ont été ajoutés étant donné leur grande importance sur le coût du prototype. La section « pneumatique » correspond à la transmission de puissance soit l'air transmis de la pompe aux vérins et la section « le rail linéaire » correspond au choix du profil de suspension.

Comme il est possible de le constater sur la Figure 6-1Figure 6-1, toutes les sections représentent entre 13% et 23% du coût total du prototype. Cela dit, aucun système ne peut considérablement être réduit pour avoir un impact majeur sur le coût total du matelas ajustable.

Néanmoins, l'aspect d'automatisation de la suspension inclut à la fois la suspension, la mécanique, la pneumatique et le rail linéaire ce qui représente environ 62,5 % (5 250 \$) du coût du prototype global. L'automatisation globale du simulateur a été complètement sous-estimée dans ce projet. Il est certain qu'une meilleure conception serait profitable dans une optique de commercialisation.

Comme le coût a explosé avec l'automatisation, il serait nécessaire de réfléchir à une approche où le nombre de configurations de suspension soit limité. Davantage de recherche serait nécessaire pour comprendre le nombre et le type de profils présents chez les humains et ainsi concevoir un matelas personnalisé à moindre coût. Avoir une impédance fixe, mais bien ajustée serait une bonne approche de réduction de coût pour une population cible telle que des gens à mobilité réduite qui souhaitent alléger leurs souffrances pendant le sommeil. D'un autre côté, si la physiologie humaine ne permet pas de réduire le nombre de profils à un nombre raisonnable, il serait possible de concevoir un lit personnalisé, ajustable pour différentes positions (latéral, spinal...) sans toutefois être adaptable pour tous. Cette approche sera plus longuement discutée dans la section 6.3.

6.2. Gestion des risques mécaniques

La gestion des risques permet notamment d'augmenter la fiabilité et la durabilité du produit. Voici les éléments qui ont été ciblés et qui demandent une recherche plus approfondie dans le cadre d'une éventuelle commercialisation.

- Après plusieurs tests qualitatifs sur le lit, les griffes de la plaque de positionnement de plastique ont atteint leur limite à la rupture à l'endroit prévu par l'étude par éléments finis mais ce après seulement une vingtaine de cycles dû à un mouvement de torsion plus prononcé des blocs de bois. Ce concept doit donc être révisé pour les prochaines versions du simulateur;
- Les forces décentrées sur les lattes ont engendré le bris de quelques cages de bois. L'assemblage des blocs de bois serait donc à revoir;
- L'usure des roulettes sera à vérifier pour éviter un roulement inégal de chaque côté de l'extrusion;

- Malgré les efforts consacrés à la réduction du bruit au niveau du système de guidage, le bruit principal provient de la pompe et des valves solénoïdes. Il serait possible, dans une version ultérieure, d'encaisser ces éléments à l'intérieur d'une boîte isolée acoustique;
- Dans un contexte d'utilisation normale, aucune protection n'a été conçue dans le cas d'infiltration de liquide à l'intérieur du lit, il sera donc important d'ajouter des protecteurs imperméables;
- Dans un contexte commercial, la plupart des gens désirent utiliser des couvertures pour la nuit. Il sera donc important de penser à des attaches pour empêcher de faire chuter les couvertures d'un côté ou l'autre du lit.

6.3. Discussion

Bien que les matelas existent depuis plusieurs siècles, il n'existe pas, à notre connaissance, de modèle mécanique ou de normes qui permettent de spécifier la courbe d'impédance mécanique requise pour assurer le confort et la santé des usagers. La revue de littérature a démontré que les matelas vendus sur le marché actuel ne sont pas ajustés et personnalisés à la physiologie humaine. Même si certains matelas innovants actuels comportent des sections à rigidités différentes afin d'améliorer le confort de la population moyenne, la rigidité du matelas impose un certain profil (F_i, X_i) sur chacune des sections. À notre connaissance, un utilisateur devrait pouvoir profiter d'un profil fixe, adapté à ses besoins avec une raideur choisie qualitativement. Ainsi, la raideur se doit d'être complètement indépendante du profil, ce qu'aucun système ne fait pour l'instant.

Ce mémoire démontre qu'il est possible de positionner un utilisateur sur un matelas à suspension pneumatique avec une certaine sensibilité de force d'environ 12% tout en garantissant différentes raideurs pour un même profil. Malheureusement, différents facteurs compromettent l'atteinte de ces objectifs : l'hystérésis du système causé par le frottement du système de guidage et de suspension, la vitesse de déplacement des lattes et la mémoire locale. Bien que le frottement des roulettes ait été réduite à 2.6 N, soit plus bas que la spécification #1 à 5 N, la friction des vérins est de l'ordre de 18 N. La vitesse de retournement des utilisateurs et le chemin parcouru par les lattes sont, en revanche, des facteurs très difficiles à contrôler dans l'intervalle de rigidité possible, soit de 0.500 N/mm en moyenne (cf. Chapitre 5 CARACTÉRISATION DU MATELAS).

À ces constats s'ajoutent les suivants, liés à la réalisation du prototype et élaborés dans ce présent document:

- Coût élevé du prototype à 8 400 \$ principalement dû à l'automatisation;
- Plusieurs gestions de risques mécaniques importantes à considérer pour une prochaine version;
- Difficultés de réglage de rigidité;

- Tests qualitatifs non officiels d'environ sept personnes qui ont jugé comme pas très confortables;
- Amélioration de la compréhension du confort en position couchée;

Par conséquent, nous ne pensons plus que le matelas conçu soit la meilleure solution dans un contexte de commercialisation pour *Matelas René inc.* Cependant, le matelas reste utile en tant que simulateur afin de trouver la raideur de la couche de confort. Ainsi, voici une proposition pour la suite du projet.

La proposition impliquerait la production de deux matelas distincts. L'objectif du premier matelas serait de faire un matelas commercial qui s'adapte à différentes positions anatomiques, mais pour un seul utilisateur. Il est nécessaire de comprendre que le lit instrumenté est beaucoup plus confortable que le lit ajustable puisque le profil est plus finement ajusté (40 lattes au lieu de 15) et qu'il est doté d'une impédance infinie. Ainsi, il serait suggéré que le matelas ajustable soit autant confortable. Le matelas proposé comporterait une vingtaine de lattes, mais seulement quatre configurations distinctes pour un utilisateur, soit pour le dos, le côté, le ventre et plan. L'annexe D fait une description approfondie du fonctionnement de cette version ultérieure.

L'objectif du second matelas serait de faire un simulateur de confort dynamique afin d'effectuer des tests qualitatifs avec différents utilisateurs et ainsi définir les meilleures rigidités de couche de confort qui seraient apposée sur le matelas ajustable. Le simulateur devra permettre une meilleure plage de raideur que 0.500 N/mm. Ce faisant, le régulateur devra être changé afin d'accepter de mettre des pressions négatives et augmenter ainsi la plage de raideur jusqu'à 4.438 N/mm, soit quasiment 9 fois plus! Aussi, les vérins devront être remplacés afin de diminuer significativement leur friction interne. L'idée serait aussi d'implanter des raideurs qui sont complètement indépendantes du profil. Ceci pourrait être fait en soutenant chaque cylindre pneumatique d'un actionneur linéaire lui permettant d'implanter presque n'importe quelle raideur sur une latte et ainsi imiter le comportement des matelas conventionnels. Il serait intéressant de pouvoir adapter la rigidité apparente à partir de la courbe de déformation pneumatique afin d'imiter celle des mousses en latex, viscoélastique et à haute résilience.

CHAPITRE VII

CONCLUSION

En conclusion, bien que les matelas existent depuis une centaine d'années, il n'existe pas, à notre connaissance, de matelas confortable qui accommode la physiologie de tous et chacun. Les matelas existants possèdent une rigidité fixe (uniforme ou par section), qui impose une certaine position à l'utilisateur. L'objectif de ce présent mémoire était de concevoir et fabriquer un matelas à lattes multiples, à impédance verticale variable, permettant d'obtenir un profil personnalisé avec ajustement.

Un profil statique personnalisé est défini comme étant un profil qui élimine complètement les forces de cisaillement intervertébrales. Pour ce faire, les forces de réaction données par le matelas doivent être les mêmes que le poids du segment au-dessus de lui, de sorte à réduire le cisaillement intervertébral, et enfin éviter les maux de dos. Un matelas a donc été conçu, fabriqué et testé avec 15 lattes à rigidité variable par le biais de systèmes mécaniques pneumatiques et systèmes à guidage vertical. Le matelas réalisé peut également être considéré comme un simulateur de raideur de confort dynamique, car plusieurs raideurs apparentes peuvent être intégrées pour un même profil (i.e article soumis dans la revue ASME Journal of Mechanical Design : *Design of a variable stiffness mattress simulator based on a personalized profile using pneumatic mechanical systems*).

Le système pneumatique comprend un cylindre pneumatique, une valve solénoïde à chaque latte, un régulateur gérant les pressions de toutes les lattes, un réservoir et un système de distribution de tubes. Le régulateur permet de contrôler la pression initiale interne des vérins et les valves permettent de fermer et d'ouvrir l'entrée d'air de chaque vérin individuellement. Un système en boucle fermée, permet d'atteindre une précision de ± 0.1 psi et une répétabilité de force d'environ 12%.

Le système de guidage vertical est muni d'une extrusion personnalisée maintenant huit roulettes avec un recouvrement polyuréthane 90A à 45°, roulant dans une cage en merisier russe. Cet assemblage permet un déplacement sur quatre pouces en minimisant le bruit tout en maximisant le contact des roulettes sur la cage. Le frottement dynamique des roulettes a ainsi été minimisé à 2.6 N.

Par contre, l'utilisation d'une suspension pneumatique a générée un frottement interne de ± 18 N ainsi qu'à un coût nécessaire en automatisation de 5250\$. L'impact du frottement s'avère non-négligeable puisqu'il réduit la répétabilité du positionnement de l'utilisateur selon son profil statique personnalisé à ± 6 mm tout en influençant le confort dynamique de l'utilisateur.

Bref, à cause de son coût élevé et sa répétabilité de profil statique de 12%, le matelas conçu ne semble pas être la solution idéale comme produit marketing pour le client. En revanche, ce matelas a permis de préciser les besoins en termes de confort en position couchée, soit un confort statique et dynamique.

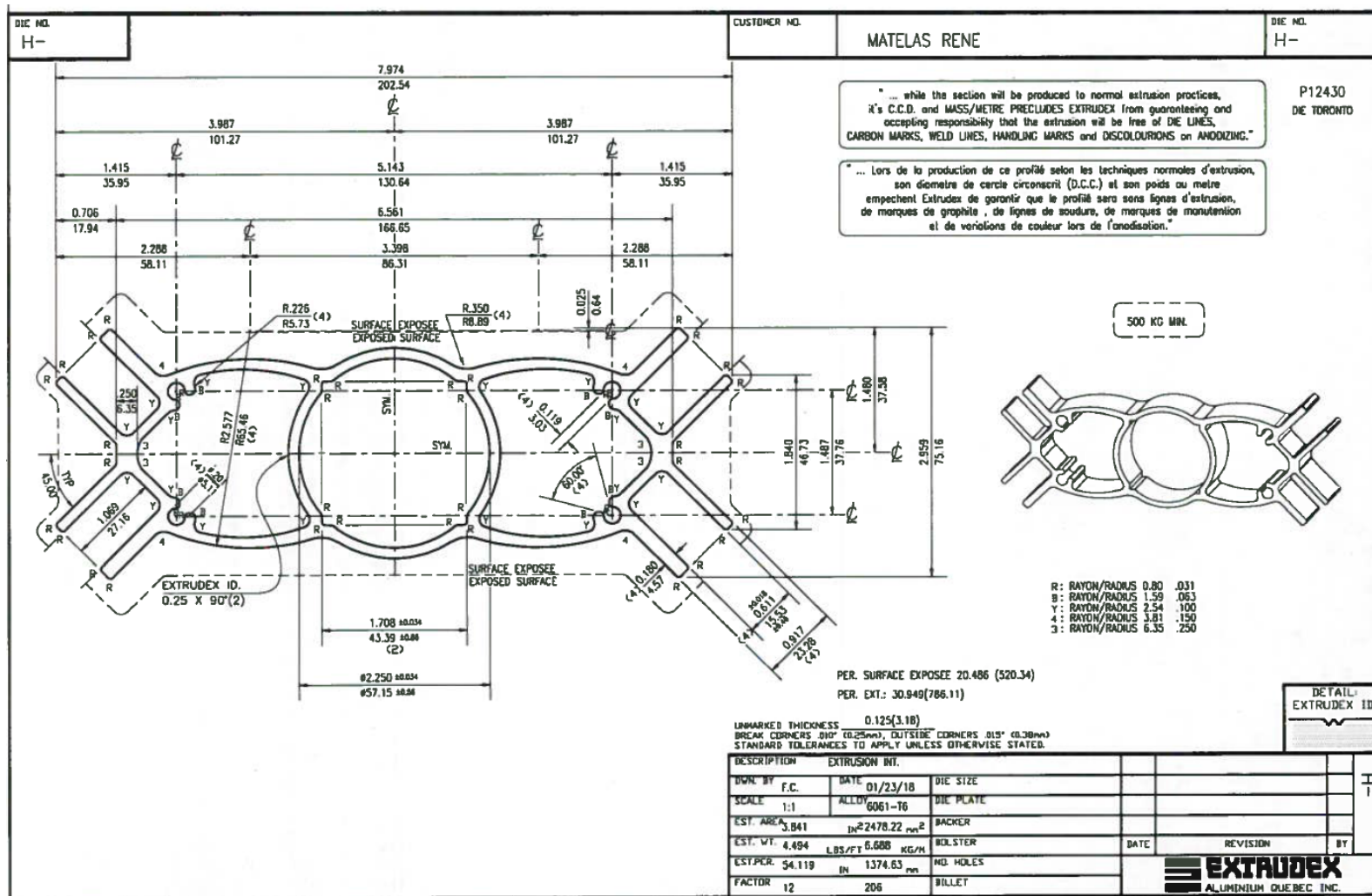
Pour les travaux futurs, un matelas commercial devrait s'adapter à différentes positions anatomiques de l'utilisateur, mais pour une seule personne. Cela dit, des profils fixes pourraient être intégrés au matelas et le changement de ces profils pourrait être géré par un maximum de seulement cinq actionneurs afin de diminuer les coûts de l'automatisation. La couche de confort du matelas pourrait être choisie qualitativement par l'utilisateur à partir d'une banque de matelas de différentes raideurs, préalablement recommandée. Ces recommandations proviendraient d'un simulateur de raideur 2^e génération, conçu et fabriqué afin de simuler les raideurs sur une plus grande plage tout en diminuant la friction des vérins pour assurer sa fiabilité.

LISTE DE RÉFÉRENCES

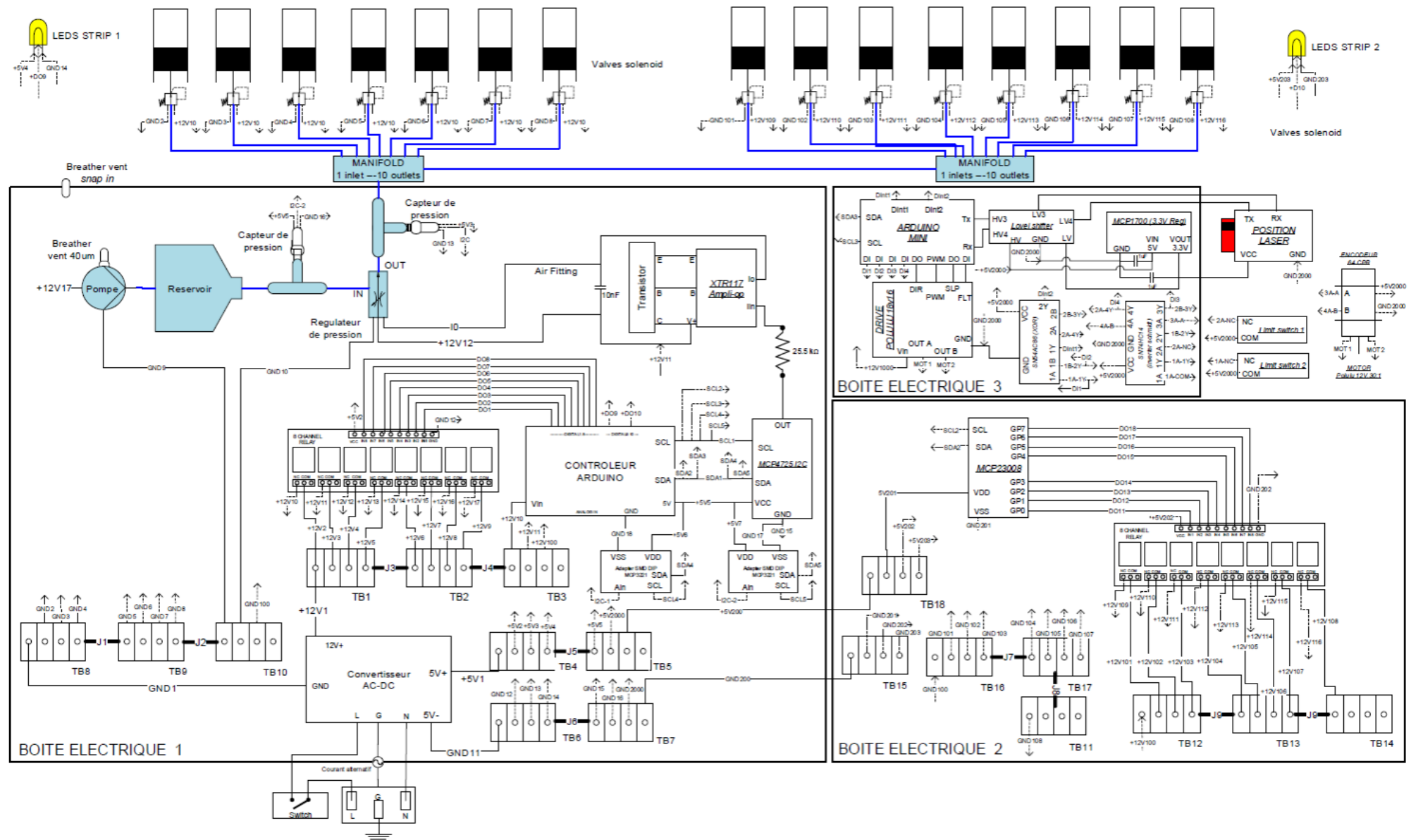
- Aoi, M., Hashimoto, K., Uemae, M., Yoshida, H., Kamijo, M., 2015. Evaluation of Sleeping Comfort of Bed Mattresses with Different Elastic Moduli for Each Body Region. *Int. J. Affect. Eng.* 14, 111–118. <https://doi.org/10.5057/ijae.14.111>
- Bader, G.G., Engdal, S., 2000. The influence of bed firmness on sleep quality. *Appl. Ergon.* 31, 487–497. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(00\)00013-2](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(00)00013-2)
- Bosch Rexroth Corp, 2011. Aluminium Framing - Linear Motion and Assembly Technologies.
- Denninger, M., Martel, F., Rancourt, D., 2011. A single step process to design a custom mattress that relieves trunk shear forces. *Int. J. Mech. Mater. Des.* 7, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10999-010-9145-z>
- Grades of Delrin ® | DuPont™ Delrin ® | DuPont É.-U. [WWW Document], n.d. URL http://www.dupont.com/products-and-services/plastics-polymers-resins/thermoplastics/articles/grades-of-delrin.html?src=gg-kg_dpm-na-delrin_delrin-grades&gclid=Cj0KCQiAgMPgBRDDARIsAOh3uyIqBGdDGDztjz6AqGWXF9BDa2cnfgu9aj8pnvI3eeQ8LgtjTkCOdFUaAvpVEALw_wcB (accessed 12.12.18).
- H. Beckman, R., 1966. Spring assembly, Brevet US3251077 A. US3251077 A.
- Haex, B., 2004. Back and Bed: Ergonomic Aspects of Sleeping. CRC Press.
- Haex, B., Sloten, J.V., Audekercke, R.V., 1996. Required stiffness distribution in a mattress for an optimal curvature of the human spine during bedrest, in: Proceedings of 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Presented at the Proceedings of 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine AMD Biology Society, pp. 495–496 vol.2. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.1996.651833>
- Hänel, S.-E., Dartman, T., Shishoo, R., 1997. Measuring methods for comfort rating of seats and beds. *Int. J. Ind. Ergon.* 20, 163–172. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(96\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(96)00049-2)
- Hoorn, R.J.V., n.d. Un bon sommeil avec le système de couchage Dorsoo [WWW Document]. Dorsoo BE. URL <http://fr.dorsoo.be/systeme-de-couchage-dorsoo/> (accessed 9.7.17).
- Ikeda, M., 1981. Mattress, Brevet US4286344A. US4286344A.
- Jacobson, B.H., Wallace, T.J., Smith, D.B., Kolb, T., 2007. Groupes comparisons of sleep quality for new and personal bedding systems. *Appl. Ergon.*
- Lee, H., Park, S., 2006. Quantitative effects of mattress types (comfortable vs. uncomfortable) on sleep quality through polysomnography and skin temperature. *Int. J. Ind. Ergon.* 36, 943–949. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2006.07.007>
- Lei, Z., Qiongjing, Y., Qiuli, W., Sabrina, K., Xiaojing, L., Changli, W., 2009. Sleep quality and sleep disturbing factors of inpatients in a Chinese general hospital. *J. Clin. Nurs.* 18, 2521–2529. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2702.2009.02846.x>
- Liu, Y., Song, C., Wang, Y., Wang, D., Liu, J., 2014. Experimental study and evaluation of the thermal environment for sleeping. *Build. Environ.* 82, 546–555. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.024>
- López-Torres, M., Porcar, R., Solaz, J., Romero, T., 2008. Objective firmness, average pressure and subjective perception in mattresses for the elderly. *Appl. Ergon.* 39, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.11.002>

- Machining of Polyurethanes [WWW Document], 1996. . Diego Plast. Inc. URL http://www.sdplastics.com/polyurethane_machining.html (accessed 12.13.18).
- Muzet, A., 2007. Environmental noise, sleep and health. *Sleep Med. Rev.* 11, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2006.09.001>
- Normand, M.C., Descarreaux, M., Poulin, C., Richer, N., Mailhot, D., Black, P., Dugas, C., 2005. Biomechanical effects of a lumbar support in a mattress. *J. Can. Chiropr. Assoc.* 49, 96–101.
- Organisation Mondiale de la Santé, 1996. Le bruit.
- Park, S.J., Kim, J.S., Kim, C.-B., 2009. Comfort evaluation and bed adjustment according to sleeping positions. *Hum. Factors Ergon. Manuf. Serv. Ind.* 19, 145–157. <https://doi.org/10.1002/hfm.20142>
- Radwan, A., Fess, P., James, D., Murphy, J., Myers, J., Rooney, M., Taylor, J., Torii, A., 2015. Effect of different mattress designs on promoting sleep quality, pain reduction, and spinal alignment in adults with or without back pain; systematic review of controlled trials. *Sleep Health* 1, 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.sleh.2015.08.001>
- Sabin, J.M., 2006. Mattress structure, Brevet US6996865. US6996865.
- Sanderson Kluft, E., 2001. Anti-roll off mattress construction, Brevet US6223370. US6223370.
- Shen, L., Chen, Y., Guo, Y., Zhong, S., Fang, F., Zhao, J., Tian-Yi, H., 2012. Research on the relationship between the structural properties of bedding layer in spring mattress and sleep quality.
- Slocum, A., 2012. Fundamentals of Design. <http://pergatory.mit.edu/resources/FUNdaMENTALs%20Book%20pdf/FUNdaMENTALs%20Topic%203.PDF>
- S.Rithalia, L.Kenney, 2000. Hospital bed mattresses: an overview of technical aspects - 030919000294021.
- Wiemer, D.-I.M., LENSSEN, D.-I.S., SARFERT, D.-I.J., GAUPP, D., HERRMANN, A., LECLERC, É., 1998. Guidage linéaire [WWW Document]. Ref TIP152WEB - Fonct. Compos. Mécaniques. URL <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/guidage-mecanique-42183210/guidage-lineaire-bm5410/> (accessed 10.24.18).
- Zhu, Y. d, Shen, L. m, Song, J., 2011. Body pressure distribution research and zone design of pocket spring mattresses, in: 2011 IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Presented at the 2011 IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering AMD Engineering Management, pp. 1656–1659. <https://doi.org/10.1109/ICIEEM.2011.603547>

Annexe A - Dessin de l'extrusion fabriquée par *Extrudex Inc.*



Annexe B – Schéma électrique global du lit ajustable



Annexe C – Code C++ Arduino (Système mécatronique)

// Libraries

```
#include <EEPROM.h> // To save configurations
#include <FastLED.h> // FastLED Library to control LED strip. WIKI:
https://github.com/FastLED/FastLED/wiki
#include <QueueList.h> // Handles FIFO queues
#include "strReplace.h" //
#include <Wire.h> // Wire library to talk I2C

#define CUSTOM_SETTINGS
#define INCLUDE_CHART_SHIELD
#define INCLUDE_PUSH_BUTTON_SHIELD
#define INCLUDE_SLIDER_SHIELD
#define INCLUDE_TERMINAL_SHIELD
#define INCLUDE_TEXT_TO_SPEECH_SHIELD
#define INCLUDE_VOICE_RECOGNIZER_SHIELD
#include <OneSheeld.h> // One Sheeld library to interface with app on Android or iOS
```

// Global variables and constants

```
const byte ADC_MCP3221_ADDR = 0x4D; // I2C address of the MCP3221 (analog in)
const byte ADC_POWER_PIN[2] = {22, 23};
const byte ADC_numByte = 2;

const byte DAC_MCP4725_ADDR = 0x60; // I2C Address of the MCP4725 (analog out), by default (A0
pulled to GND).
const byte DAC_cmd_write = 0x40;
const byte DAC_cmd_writeEEPROM = 0x60;

const byte EXP_MCP23008_ADDR = 0x20; // I2C address of the MCP23008 (8 bit I/O extender)
const byte EXP_cmd_setIODIR = 0x00;
const byte EXP_cmd_setGPIO = 0x09;

#define COLOR_ORDER GRB
#define CHIPSET WS2812
const byte BRIGHTNESS = 128; // 0-255, beware not to overload power supply. Max current = 10A,
const byte LED_DATA_PIN1 = 46; // String #1 starts from head to pelvis, long string, from box #2
const byte LED_DATA_PIN2 = 50; // String #2 stars from pelvis to foot, short string, from box #1
const byte NUM_LED1 = 30;
const byte NUM_LED2 = 25;
const byte NUM_LED = NUM_LED1 + NUM_LED2;
CRGB leds[NUM_LED];
CRGB leds1[NUM_LED1];
CRGB leds2[NUM_LED2];
#include "LedPatterns.h"
typedef enum {CLOSED, SOLID, PULSE, SCAN, FIRE} LedStates;
LedStates LedState;

volatile long LastEncoderCount; // In encoder increment
```

```

volatile float LastLaserMeasurement; // mm
const unsigned long MaxEncoderCount = 180500; // 94 turns, 64 cpr, 30:1 gear
const unsigned int OffsetLaser_LED = 1 * MaxEncoderCount / 80; // 1po each side from LED end to
LimitSwitch, in number of increment
const float OffsetLath_LED = 0.5; // Position of 1st lath center versus origin, in number of lath
const float LaserLEDInfluenceLength = 0.8;
const float ValveLEDInfluenceLength = 2.0;

const byte NUM_LATH = 15;

//const float PressureDos[NUM_LATH] = {7.54, 7.0, 6.4, 9.2, 12.4, 12, 10.6, 8.9, 10, 11.6, 10.7, 9, 6.4,
6.1, 6.7}; // [TONG] The pressure when the piston is fully extended (offset = 0);
const float PressureDos[NUM_LATH] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 12.1, 11.4, 11.6, 9.3, 10.6, 11.7, 6.5, 9.2, 0}; //
The pressure when the piston is fully extended (offset = 0);
const float PressureDosP2[NUM_LATH] = {17.4, 16, 17, 31, 27.7, 23.5, 23.5, 26.3, 23.5, 19.6, 16.2, 16,
14.1, 12.7, 14.8}; // Pressure at operating point (P2)
const float PressureDosOffset35[NUM_LATH] = {13.6, 12.6, 12.3, 20, 22.1, 20.3, 18.8, 18.1, 18.3, 18.5,
16.3, 14.6, 11.3, 10.6, 11.9}; // The pressure when the piston is fully extended (offset = 35)
const float PressureDosOffset70[NUM_LATH] = {16.2, 15, 14.9, 24.6, 26.3, 23.8, 22.4, 22, 21.8, 21.4,
18.8, 17, 13.4, 12.5, 14.1}; // The pressure when the piston is fully extended (offset = 70)
const float PressureCote[NUM_LATH] = {8.1, 6.3, 4.7, 8.7, 11.3, 14.4, 13.1, 10.8, 9.5, 10.1, 9.5, 8.9, 6.9,
6.5, 6.9}; // The pressure when the piston is fully extended (offset = 0);
const float PressureCoteP2[NUM_LATH] = {17.4, 16, 17, 31, 27.7, 23.5, 23.5, 26.3, 23.5, 19.6, 16.2, 16,
14, 12.7, 14.8}; // The pressure when the piston is fully extended (offset = 70)
const float PressureCoteOffset35[NUM_LATH] = {14.1, 12, 10.6, 19.6, 21, 22.7, 21.4, 20, 17.7, 17, 15.2,
14.5, 11.8, 10.9, 12.1}; // Pressure at operating point (P2)
const float PressureCoteOffset70[NUM_LATH] = {20.2, 17.6, 16.6, 30.4, 30.7, 30.9, 29.6, 29.2, 26, 23.8,
20.9, 20.2, 16.7, 15.4, 17.3}; // The pressure when the piston is fully extended (offset = 35)
const float PressureDosTronc[NUM_LATH] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 24, 27.8, 23.5, 17.3, 19.5, 22.1, 13.1, 17.9,
0};

float Pressure[NUM_LATH];

unsigned int LathAdjust = 0; //0x2AAA; // 16-bit
byte LathAdjustCycle = 0;
const float MAX_PRESS = 60.0; // psi
const float MIN_PRESS = 0.0; // psi
const float MAX_RESERVOIR_PRESS = 35.5; // psi : 250 kPa = 36.25 psi
const float MIN_RESERVOIR_PRESS = 30.0; // psi
const float PRESS_SENS_SENS = 100.0 / (((1<<12)-1) * 4 / 5); // Sinsitivity in psi/increment for pressure
sensor: 12 bit ADC (0-5V) and 0.5-4.5V (0-100psi) sensor
const float PRESS_SENS_OFFSET = 0.5 * 100 / 4; // psi
const float PRESS_REG_SENS = (((1<<12)-1) / 20.0 * 16 / 60; // increment/psi for pressure regulator 0 -
60 psi = 4 - 20 mA and 0 - 20 mA = 0 - 4095
const float PRESS_REG_OFFSET = (((1<<12)-1) * 4.0/20; // increment
const byte PRESS_SENS_INDEX_RESERVOIR = 0;
const byte PRESS_SENS_INDEX_MANIFOLD = 1;
const byte PIN_PUMP = 24;
const byte PIN_RELAY_GND = 25;
const byte NUM_VALVE_BOX1 = 7;
const byte PIN_VALVE[NUM_VALVE_BOX1] = {26, 28, 30, 32, 34, 36, 38};

```



```

bool PinState = false;

const byte ARD_MEGA_ADDR = 0x77;
const byte ARD_NANO_ADDR = 0x11;
enum {CMD_MOVE, CMD_MEASURE, CMD_MOVE_MEASURE, REQ_IN_TARGET,
REQ_READY, REQ_LASER, REQ_COUNTER, REQ_TEXT}; // Command and request identifiers from
MEGA to NANO (commands will not be answered, requests need to be answered)
QueueList <String> TerminalQueue;
QueueList <String> VoiceQueue;
typedef enum {INIT, HOMING, IDLE, ADJUST_PRESSURE, WAIT_LASER, LASER_RECEIVED,
WAIT_PRESSURE} States;
bool Wait_Pump = false;
bool StateCycle = false;
States State = INIT;
bool LoveIsInTheAir = false;

unsigned long LoopTime;
const unsigned long PERIOD_CHECK_PUMP_INIT = 10000; // Every minute when not using the pressure
regulator or pumping
const unsigned long PERIOD_CHECK_PUMP_FAST = 1000; // Every second when regulating the
pressure or pumping
unsigned long Period_CheckPump = PERIOD_CHECK_PUMP_INIT;
const unsigned long Period_AdjustPressure = 400;
const unsigned long Period_CheckRegulator = 500;
const unsigned long Period_CheckReady = 500;
const unsigned long Period_CheckTextNano = 2500;
const unsigned long Period_CheckTerminal = 2000;
const unsigned long Period_RefreshGraph = 10000;
const unsigned long Period_RefreshLED = 40;
const unsigned long Period_FlashLED = 100;
const unsigned long Period_LEDFlash = 500;
const unsigned long Period_Debug = 1000;
byte LED_RedFlashes = 0;
byte LED_GreenFlashes = 0;
bool DebugState = false;

// Devices sub functions

float ADC_read(byte ADC_NUM, int numSamples) {
// Local variables
uint8_t i;
bool success;
uint16_t result;
int samples[numSamples];
float average;

////////////////////
// MCP3221 for pressure gauge

// Power on the corresponding ADC using digital pin
digitalWrite(ADC_POWER_PIN[ADC_NUM],HIGH);

// Sample the data

```

```

for (i = 0; i<numSamples; i++) {
  do {
    success = Wire.requestFrom(ADC_MCP3221_ADDR, ADC_numByte) == ADC_numByte; // Tell
    ADC to send out its data (MSB then LSB) and check for communication success
    if (success) {
      // Bitshift approach with a single variable
      // Reading MSB first and shift it 8 bits over, then read again
      result = Wire.read();
      result = result<<8;
      result += Wire.read();
      samples[i] = result; // Store value in array
    }
    else {
      TerminalQueue.push("ADC_read unsuccessful"); // Never happened
    }
  } while (!success); // Re-initiate sampling if unsuccessful
}

// Power off ADC
digitalWrite(ADC_POWER_PIN[ADC_NUM],LOW);

// Average the readings
uint32_t sum; // Unsigned long integer (32 bits) so there is no variable overload
for (i = 0; i<numSamples; i++) {
  sum += samples[i];
}
average = sum / numSamples * PRESS_SENS_SENS - PRESS_SENS_OFFSET;

return average; // psi
}

// Digital to Analog Converter (DAC) to Pressure regulator

void DAC_setVoltage(uint16_t output, bool writeEEPROM) {
  // https://github.com/adafruit/Adafruit\_MCP4725
  Wire.beginTransmission(DAC_MCP4725_ADDR);

  // Send command type to MCP4725
  if (writeEEPROM) {
    Wire.write(DAC_cmd_writeEEPROM);
  }
  else {
    Wire.write(DAC_cmd_write);
  }

  // Send data
  Wire.write(output / 16); // Division by 16: Upper data bits (D11.D10.D9.D8.D7.D6.D5.D4)
  Wire.write((output % 16) << 4); // Modulo 16, shifted 4 times left: Lower data bits
  (D3.D2.D1.D0.x.x.x.x)

  Wire.endTransmission();
}

```

```
////////////////////////////////////
```

```
void EXP_write8(uint8_t cmd, uint8_t data){  
  // https://github.com/adafruit/Adafruit-MCP23008-library  
  // https://github.com/oksbnw/MCP23008/blob/master/blink.txt  
  Wire.beginTransmission(EXP_MCP23008_ADDR); // I2C address (DAC)  
  Wire.write(cmd);  
  Wire.write(data);  
  Wire.endTransmission();  
}
```

```
////////////////////////////////////
```

```
//
```

```
// I2C functions
```

```
//
```

```
void ReceiveI2C(int bytes){ // Message received from NANO, print it to terminal to debug (limit usage if possible)
```

```
  char buff[32];  
  int i=0;  
  char c;  
  while (Wire.available()){  
    c = Wire.read();  
    if (c==0x00 && i<=bytes) { // insure we have no prematurely NUL terminated char array if a  
NUL character is in received message by replacing it with FF  
      buff[i++] = 0xFF;  
    }  
    else {  
      buff[i++] = c;  
    }  
  }  
  //String buff;  
  //buff+=char(Wire.read());  
  }  
  //TerminalQueue.push("I2C Just received x bytes");  
  //TerminalQueue.push(String(bytes));  
  TerminalQueue.push(buff);  
}
```

```
long SendRequestNANO(const byte commandID, long commandData, const byte responseSize) {
```

```
  // Last byte of command should be command ID as per enum
```

```
  // Rest is for data transmission such as target position
```

```
    int i=0;  
    char buffChar[32];  
    byte buffByte[4];  
    //byte commandID = command & 0xFF;  
    //unsigned long commandData = (command & 0xFFFFFFF00) >> 8; //24 bit worth of data can be sent,  
always positive?  
    signed long answer=0; //32 bit
```

```
    Wire.beginTransmission(ARD_NANO_ADDR);  
    Wire.write(commandID);  
    if (commandData) {  
      for (int i=0; i<sizeof(long); i++) {  
        buffByte[sizeof(long)-i-1] = commandData & 0xFF;
```

```

    commandData = commandData >> 8;
}
Wire.write(buffByte, sizeof(long));
}
if (Wire.endTransmission() == 0) { // success
    if (responseSize) {
        if (Wire.requestFrom(ARD_NANO_ADDR, responseSize)) { // Got a response
            // Read the response
            if (commandID == REQ_TEXT) {
                while (Wire.available()){
                    buffChar[i++] = Wire.read();
                }
                if (buffChar[0] != 0) {
                    TerminalQueue.push(buffChar);
                }
            }
        }
        else {
            while (Wire.available()) {
                answer = (answer << 8) + Wire.read();
            }
            // Put the response in corresponding global variable or return it
            switch (commandID) {
                case REQ_IN_TARGET:
                    return answer;
                    break;
                case REQ_READY:
                    return answer;
                    break;
                case REQ_LASER:
                    LastLaserMeasurement = answer / 10.0; // Convert from 0.0001m * 10000 to mm
                    TerminalQueue.push("Laser (mm):");
                    TerminalQueue.push(String(LastLaserMeasurement));
                    break;
                case REQ_COUNTER:
                    LastEncoderCount = answer;
                    TerminalQueue.push("Counter (count):");
                    TerminalQueue.push(String(LastEncoderCount));
                    break;
            }
        }
    }
    else { // No response
        TerminalQueue.push("No response from NANO!");
    }
}
}
else { // failure ... maybe slave wasn't ready or not connected
    TerminalQueue.push("NANO is unavailable");
}
}

void CheckTextNANO() {
    static unsigned long LastCheckTextTime;

```



```

        delay(300); // !!!
        ValveSet(0);
    }
    break; // Adjust only one lath each time
}
}
}
}
}
}
}

```

// User interface functions

```

void CheckTerminal() {
    static unsigned long LastUpdateTime;
    if ((LoopTime - LastUpdateTime) > Period_CheckTerminal) {
        LastUpdateTime = LoopTime;

        int i=0;
        char buffChar[32];
        char c;
        String buff;
        while (Terminal.available()){
            c = Terminal.read();
            buffChar[i++] = c;
            buff += c;
        }
        //buff = str(buffChar);
        if (buff.length() > 0) {
            //TerminalQueue.push("ECHO:");
            //TerminalQueue.push(buff);

            // Parse text command
            if (strstr(buffChar, "cycle")) {
                StateCycle = true;
            }
            else if (strstr(buffChar, "stop") || strstr(buffChar, "close")) {
                StateCycle = false;
                // Close each valve
                ValveSet(0);
            }
            else if (strstr(buffChar, "mid")) {
                //LathAdjust = 0x7FFF;
                StateCycle = false;
                ValveSet(0x3FC0);
            }
        }

        // Dos, coté, pression cste, adapté (idéale), idéale + offset, plat

        else if (strstr(buffChar, "each")) {
            LathAdjust = 0x7FFF; // Adjust pressure in each lath according to stored values
        }
        else if (strstr(buffChar, "all")) {
            ValveSet(0xFFFF); // Open all valves
        }
    }
}

```

```

}
else if (strstr(buffChar, "dos o1")) {
    //LathAdjust = 0x7FF;
    StateCycle = true;
    memcpy(&Pressure,&PressureDosOffset35,sizeof(PressureDosOffset35[0])*15);
}
else if (strstr(buffChar, "dos o2")) {
    //LathAdjust = 0x7FF;
    StateCycle = true;
    memcpy(&Pressure,&PressureDosOffset70,sizeof(PressureDosOffset70[0])*15);
}
else if (strstr(buffChar, "dos p2")) {
    //LathAdjust = 0x7FF;
    StateCycle = true;
    memcpy(&Pressure,&PressureDosP2,sizeof(PressureDosP2[0])*15);
}
else if (strstr(buffChar, "dos")) {
    //LathAdjust = 0x7FF;
    StateCycle = true;
    memcpy(&Pressure,&PressureDos,sizeof(PressureDos[0])*15);
}
else if (strstr(buffChar, "cote o1")) {
    //LathAdjust = 0x7FF;
    StateCycle = true;
    memcpy(&Pressure,&PressureCoteOffset35,sizeof(PressureCoteOffset35[0])*15);
}
else if (strstr(buffChar, "cote o2")) {
    //LathAdjust = 0x7FF;
    StateCycle = true;
    memcpy(&Pressure,&PressureCoteOffset70,sizeof(PressureCoteOffset70[0])*15);
}
else if (strstr(buffChar, "cote p2")) {
    //LathAdjust = 0x7FF;
    StateCycle = true;
    memcpy(&Pressure,&PressureCoteP2,sizeof(PressureCoteP2[0])*15);
}
else if (strstr(buffChar, "cote")) {
    //LathAdjust = 0x7FF;
    StateCycle = true;
    memcpy(&Pressure,&PressureCote,sizeof(PressureCote[0])*15);
}
else if (strstr(buffChar, "tronc p2")) {
    //LathAdjust = 0x7FF;
    StateCycle = true;
    memcpy(&Pressure,&PressureDosTronc,sizeof(PressureDosTronc[0])*15);
}
else if (buff.toInt() >= 1 && buff.toInt() <= NUM_LATH) {
    ValveSet(1<<(buff.toInt()-1));
}
}
}
}
}

```



```

void VoiceCommand (char *commandSpoken) {
    /* VoiceCommand exists under the loop function. */
    /* This function will be invoked each time a new command is given. */

    int i;

    bool CommandComplete = false;
    const int MaxCmdLEN = 500;
    char commandInterp[MaxCmdLEN];

    bool Adjust = false;
    bool SetValve = false;
    bool ValveState = false;
    float Direction = 0;
    bool LoadProfile = false;
    bool SaveProfile = false;
    float PressureCmd = -1.0;

    char Test1[20];
    char Test2[20];
    char Test3[20];
    char Test4[20];
    char *TestNum;
    const char CH_memo[] = {'c', 'h', 0xC3, 0xA9, 'r', 'i', '\0'}; // chéri
    const char CH_cote[] = {'c', 0xC3, 0xB4, 't', 0xC3, 0xB4, '\0'}; // côté
    const char CH_etein[] = {0xC3, 0xA9, 't', 'e', 'i', 'n', '\0'}; // étein
    const char CH_cheri[] = {'m', 0xC3, 0xA9, 'm', 'o', '\0'}; // mémo
    const char CH_verin[] = {'v', 0xC3, 0xA9, 'r', 'i', 'n', '\0'}; // mémo
    const char CH_lumiere[] = {'l', 'u', 'm', 'i', 0xC3, 0xA8, 'r', 'e', '\0'}; // lumière
    const char CH_rangee[] = {'r', 'a', 'n', 'g', 0xC3, 0xA9, 'e', '\0'}; // rangée
    const char CH_zero[] = {'z', 0xC3, 0xA9, 'r', 'o', '\0'}; // zéro
    const char CH_a[] = {0xC3, 0xA0, '\0'}; // à
    const char *Numbers[NUM_LATH] = {"un", "deux", "trois", "quatre", "cinq", "six", "sept", "huit", "neuf",
    "dix", "onze", "douze", "treize", "quatorze", "quinze"};
    const char *ProfileNames[4] = {"principal", CH_cote, "dos", "ventre"};

    LathAdjust = 0; // !!!!

// Parse command and take action accordingly

    if (State == IDLE){
        if (strlen(commandSpoken) < MaxCmdLEN - 2){
            strcpy(commandInterp, commandSpoken);
            //strPad(commandInterp, MaxCmdLEN); // Add " " at the beginning and at the end of string
            //TerminalQueue.push(commandInterp);

            // Action type by priority
            if (strstr(commandInterp, "led") || strstr(commandInterp, "laid") || strstr(commandInterp, CH_lumiere) ||
            strstr(commandInterp, "coul") || strstr(commandInterp, "ambian") ) {
                CommandComplete = true;
                if (strstr(commandInterp, "ferme") || strstr(commandInterp, "off") || strstr(commandInterp, CH_etein))
                LedState = CLOSED;
                else if (strstr(commandInterp, "ouvre") || strstr(commandInterp, "on") || strstr(commandInterp,

```

```

"allume") || strstr(commandInterp, "normal")) LedState = SOLID;
    else if (strstr(commandInterp, "puls") || strstr(commandInterp, "respir")) LedState = PULSE;
    else if (strstr(commandInterp, "arc-en-ciel") || strstr(commandInterp, "balay")) LedState = SCAN;
    else if (strstr(commandInterp, "feu") || strstr(commandInterp, "bois")) LedState = FIRE;
    else CommandComplete = false;
}
else if (strstr(commandInterp, "valv") || (strstr(commandInterp, "vulv")) || strstr(commandInterp,
CH_verin)) {
    SetValve = true;
    if (strstr(commandInterp, "ferme") || strstr(commandInterp, "off") || strstr(commandInterp, CH_etein))
ValveState = false;
    else if (strstr(commandInterp, "ouvre") || strstr(commandInterp, "on") || strstr(commandInterp,
"allume")) ValveState = true;
}
else if (strstr(commandInterp, "monte") || (strstr(commandInterp, "montre")) || strstr(commandInterp,
"augmente") || strstr(commandInterp, "ajoute")) Direction = 1.0;
    else if (strstr(commandInterp, "descend") || strstr(commandInterp, "diminu") || strstr(commandInterp,
"baiss") || strstr(commandInterp, "retire")) {
        Direction = -1.0;
        strReplace(commandInterp, "dimin", "", MaxCmdLEN); // Could be falsly interpreted as "min"
    }
    else if (strstr(commandInterp, "ajust") || strstr(commandInterp, "met") || strstr(commandInterp, "mais") ||
strstr(commandInterp, "place")) {
        Adjust = true;
    }
    else if (strstr(commandInterp, "enregistre") || strstr(commandInterp, "save") || strstr(commandInterp,
"sauve") ||
        strstr(commandInterp, "souv") || strstr(commandInterp, "retien") || strstr(commandInterp, "reten") ||
        strstr(commandInterp, CH_memo)) SaveProfile = true;
    else if (strstr(commandInterp, "charge") || strstr(commandInterp, "restore") || strstr(commandInterp,
"load") ||
        strstr(commandInterp, "profil") || strstr(commandInterp, "config")) {
        LoadProfile = true;
    }
    else if (strstr(commandInterp, CH_cheri) || strstr(commandInterp, "vien") || strstr(commandInterp,
"amour") ||
        strstr(commandInterp, "baise") || strstr(commandInterp, "galip") || strstr(commandInterp, "swing")
||
        strstr(commandInterp, "chau")) {
        LoveIsInTheAir = true;
        LedState = FIRE;
    }
}

// Find lath number

if (Direction!=0 || Adjust || LoveIsInTheAir || SetValve) {
    if (strstr(commandInterp, "tout") || LoveIsInTheAir) {
        LathAdjust = 0xFFFF; // Remember every lath
    }
    else {
        // Replace (rangée, late, date, lettre, lac) by latte
        strReplace(commandInterp, CH_rangee, "latte", MaxCmdLEN);
        strReplace(commandInterp, "late", "latte", MaxCmdLEN);
    }
}

```

```

strReplace(commandInterp, "valve", "latte", MaxCmdLEN); // ??
strReplace(commandInterp, "laval", "latte", MaxCmdLEN); // ??
strReplace(commandInterp, "date", "latte", MaxCmdLEN);
strReplace(commandInterp, "lettre", "latte", MaxCmdLEN);
strReplace(commandInterp, "lac ", "latte ", MaxCmdLEN);
// Replace (c'est, s'est, cette, cet, set) by sept
strReplace(commandInterp, "c'est", "sept", MaxCmdLEN);
strReplace(commandInterp, "s'est", "sept", MaxCmdLEN);
strReplace(commandInterp, "cette", "sept", MaxCmdLEN);
strReplace(commandInterp, " cet", " sept", MaxCmdLEN);
strReplace(commandInterp, " set", " sept", MaxCmdLEN);
// Replace (truite) by huit
strReplace(commandInterp, "truite", "huit", MaxCmdLEN);
// Replace all "latte X" by "latte A", reverse order to distinguish lath 10 to 15 from lath 1.
for (i=NUM_LATH - 1; i>=0; i--) {
    sprintf(Test1, "%s %i", "latte", i+1);
    sprintf(Test2, "%s %s", "latte", Numbers[i]);
    strReplace(commandInterp, Test1, Test2, MaxCmdLEN);
}

```

```

// Find wich lath to address
for (i=0; i<NUM_LATH; i++) {
    sprintf(Test1, "%s %s", "latte", Numbers[i]);
    if (strstr(commandInterp, Test1) || strstr(commandInterp, Test2) || strstr(commandInterp, Test3)) {
        LathAdjust |= 1<<i; // Bit shift to remember corresponding lathes
    }
}
}

```

// Parse command pressure (psi)

```

if (SetValve) {
    Adjust = true;
    PressureCmd = MIN_PRESS;
}
else if (strstr(commandInterp, "max") || strstr(commandInterp, "haut") || strstr(commandInterp, "top") ||
strstr(commandInterp, "dans le tapis")) {
    Adjust = true; // Even if it was initially based on Direction
    PressureCmd = MAX_PRESS;
}
else if (LoveIsInTheAir || strstr(commandInterp, "min") || strstr(commandInterp, "bas") ||
strstr(commandInterp, "plancher") || strstr(commandInterp, " 0") || strstr(commandInterp, CH_zero)) {
    Adjust = true; // Even if it was initially based on Direction
    PressureCmd = MIN_PRESS;
}
else if (strstr(commandInterp, "un peu")) {
    PressureCmd = 0.5;
}
else {
    for (i=MAX_PRESS*2; i>=-MAX_PRESS; i--){
        if (i>=0 && i<NUM_LATH) TestNum = Numbers[i];
        else TestNum = "1000";
        sprintf(Test1, "%s %i", CH_a, i+1);
    }
}

```

```

    sprintf(Test2, "%s %s", CH_a, TestNum);
    sprintf(Test3, "%s %i", "de", i+1);
    sprintf(Test4, "%s %s", "de", TestNum);
    if (strstr(commandInterp, Test1) || strstr(commandInterp, Test2)) {
        Adjust = true;
        PressureCmd = i+1;
        break; // First found = ok
    } else if (strstr(commandInterp, Test3) || strstr(commandInterp, Test4)) {
        Direction = 1.0;
        PressureCmd = i+1;
        break; // First found = ok
    }
}
}
}
if (LathAdjust!=0 && PressureCmd>-1.0){
    //State = ADJUST_PRESSURE;
    CommandComplete = true;
    for (i=0; i<NUM_LATH; i++) {
        if (LathAdjust & 1<<i) {
            if (Adjust){ // Direct adjustment
                Pressure[i] = PressureCmd;
            }
            else { // Consider direction
                Pressure[i] += Direction*PressureCmd;
            }
            Pressure[i] = constrain(Pressure[i], MIN_PRESS, MAX_PRESS);
        }
    }
    if (ValveState) ValveSet(LathAdjust); // Open selected valves
    else { // Close selected valves
        LathAdjust = ~LathAdjust;
        ValveSet(LathAdjust);
    }
}

} else if (SaveProfile || LoadProfile) {
    // Dermine profile number

```

// Enregistre, save // 1: 1, un, initiale, dos, normale 2: 2, deux, supplémentaire, alternative, côté (ASCII!), 3: 3, trois, ventre, ...

// Charge, load, configure, ...

```

} else if (LoveIsInTheAir) {
    // State = ADJUST_PRESSURE;
    CommandComplete = true;
    LoveIsInTheAir = true;
    LathAdjust = 0xFFFF; // Remember every lath
    for (i=0; i<NUM_LATH; i++) {
        Pressure[i] = 0;
    }
}
}

```

```

    if (CommandComplete) {
        VoiceQueue.push("D'accord, je m'y applique.");
        LED_GreenFlashes = 4;
    }
    else {
        VoiceQueue.push("Commande indisponible."); //("Malheureusement, je l'ai pas comprise. Veuillez
essayer de nouveau.");
        LED_RedFlashes = 4;
    }
}
else {
    VoiceQueue.push("Cette commande est trop longue.");
    LED_RedFlashes = 4;
}
}
else VoiceQueue.push("Malheureusement, une action est en cours. Veuillez patienter.");
TerminalQueue.push(commandSpoken);
TerminalQueue.push(commandInterp);
}

void RefreshGraph() {
    static unsigned long LastUpdateTime;
    if ((LoopTime - LastUpdateTime) > Period_RefreshGraph) {
        LastUpdateTime += Period_RefreshGraph;
        Chart.clear(CHART_0);
        for (int i=0; i<NUM_LATH/3; i++) {
            Chart.add("Head",Pressure[i]);
            Chart.add("Pelvis",Pressure[i+5]);
            Chart.add("Foot",Pressure[i+10]);
            Chart.plot();
        }
    }
}

void RefreshLED() {
    int i;
    static unsigned long LastUpdateTime;
    static unsigned long LastFlashTime;
    static byte LedValues[NUM_LED];
    byte* FlashStatus=&LED_GreenFlashes; // Initially point toward green flashes

    if ((LoopTime - LastUpdateTime) > Period_RefreshLED) {
        LastUpdateTime = LoopTime;

        // Flashes

        if (LED_RedFlashes) {
            FlashStatus = &LED_RedFlashes;
            fill_solid(leds, NUM_LED, CRGB::DarkRed);
        }
        else if (LED_GreenFlashes) {

```

```

FlashStatus = &LED_GreenFlashes; // Though it should already be pointing to LED_GreenFlashes
fill_solid(leds, NUM_LED, CRGB::DarkGreen);
}

if (*FlashStatus && (LoopTime - LastFlashTime) > Period_FlashLED) {
    // Flashing effect
    LastFlashTime = LoopTime;
    FastLED.setBrightness(((FlashStatus & 1) != 1) * BRIGHTNESS);
    *FlashStatus = *FlashStatus - 1; // Decrease number of flashes remaining
}
else if (!FlashStatus) { // Let the priority to flashes
    // Compute led colors according to some special patterns
    FastLED.setBrightness(BRIGHTNESS); // Flashes ends with 0 brightness, so it si needed to reset it
    switch (LedState) {
        case CLOSED:
            fill_solid(leds, NUM_LED, CRGB::Black);
            break;
        case SOLID:
            fill_solid(leds, NUM_LED, CRGB::Wheat);
            break;
        case PULSE:
            LedColorPulse();
            break;
        case SCAN:
            LedPaletteScan();
            break;
        case FIRE:
            LedFire();
            break;
    }
}

//LastEncoderCount += 1000;
//if (LastEncoderCount > MaxEncoderCount) LastEncoderCount-=MaxEncoderCount;

// Add air and laser effects if any
if (LedState != FIRE) { // Fire burns everything!
    float IndexLaser = (float)((LastEncoderCount + OffsetLaser_LED) * NUM_LED) /
(MaxEncoderCount + 2 * OffsetLaser_LED - 1);
    float Influence;
    for (i=0; i<NUM_LED; i++) {
        // Superimpose air effect
        for (int ii=0; ii<NUM_LATH; ii++){
            if (LathAdjust & 1<<ii) {
                float IndexLath = (float)((ii + OffsetLath_LED) * NUM_LED) / (NUM_LATH + 2 *
OffsetLath_LED - 1);
                Influence = constrain((ValveLEDInfluenceLength - abs(IndexLath - i)) /
ValveLEDInfluenceLength, 0, 1) * 255;
                if (Influence) leds[i] = CRGB::DodgerBlue;
            }
        }
    }
    // Superimpose laser effect
    if (State == WAIT_LASER) { // Display only when waiting for position i.e. motor moves or laser is

```

```

measuring
    Influence = constrain((LaserLEDInfluenceLength - abs(IndexLaser - i)) /
LaserLEDInfluenceLength, 0.0, 1.0) * 255.0;
    if (Influence) leds[i] = CRGB(Influence, 0, 0);
    }
    }
    }
}

// Transfer combined led data into individual led strings

memcpy8(&leds1[0], &leds[0], NUM_LED1 * sizeof(CRGB));
memcpy8(&leds2[0], &leds[NUM_LED1], NUM_LED2 * sizeof(CRGB));
FastLED.show(); // Nothing visible really occurs before this call
}
}

void ButtonChange(byte isButtonPressed) {
    // ButtonChange exists under the loop function.
    // This function will be invoked each time a button is pressed.
    if (isButtonPressed) {
        ValveSet(0xFFFF);
    }
    else{
        ValveSet(0x00);
    }
}

void SliderChange(byte sliderValue) { //0-255
    // SliderChange exists under the loop function.
    // This function will be invoked each time a slider position is changed.

    // Transform sliderValue to pressure value and assign it to active lath(es)
    RegulatorSetPressure(sliderValue*60.0/255);
}

//
// Onboard LED function
//
void LEDFlash() {
    static unsigned long LastUpdateTime;
    if ((LoopTime - LastUpdateTime) > Period_LEDFlash) {
        LastUpdateTime = LoopTime;
        digitalWrite(LED_BUILTIN,PinState);
        PinState = !PinState;
    }
}

//
// Debug functions
//
void Debug() {

```

```

static unsigned long LastUpdateTime;
if ((LoopTime - LastUpdateTime) > Period_Debug) {
    LastUpdateTime = LoopTime;

    if (DebugState) {
        DAC_setVoltage(2048, false);
        //Serial.println("HIGH");
        //ValveSet(0x01);
    }
    else {
        DAC_setVoltage(0, false);
        //Serial.println("LOW");
        //ValveSet(0);
    }

    DebugState = !DebugState;
}
}

//
// Main program
//
void setup() {
    // ADC power pin initialisation
    pinMode(ADC_POWER_PIN[0], OUTPUT);
    pinMode(ADC_POWER_PIN[1], OUTPUT);

    // Onboard LED
    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);

    // Sanity delay before initializing communications
    delay(5000);

    // Initialize I2C communication
    Wire.begin(ARD_MEGA_ADDR);
    TWBR = 12; //Set speed to 400 kHz

    // Set all relay pins to high
    digitalWrite(PIN_PUMP, HIGH);
    ValveSet(0); //Means closed valves

    // Set all relay pin as output
    pinMode(PIN_PUMP, OUTPUT);
    for (int i=0; i<NUM_VALVE_BOX1; i++) {
        pinMode(PIN_VALVE[i], OUTPUT);
    }
    EXP_write8(EXP_cmd_setIODIR, 0x00);

    // Close relay board circuit by letting ground flow
    digitalWrite(PIN_RELAY_GND, HIGH);
    pinMode(PIN_RELAY_GND, OUTPUT);

    // Initialize LEDs and set color to black (inactive)

```



```

        FastLED.addLeds<CHIPSET, LED_DATA_PIN1, COLOR_ORDER>(leds1,
NUM_LED1).setCorrection(TypicalLEDStrip);
        FastLED.addLeds<CHIPSET, LED_DATA_PIN2, COLOR_ORDER>(leds2,
NUM_LED2).setCorrection(TypicalLEDStrip);
        FastLED.setMaxPowerInVoltsAndMilliamps(5,7000); // Max 5V, 7A. Software function. Might not be
100% accurate, thus the 3A safety gap.
        FastLED.setBrightness(BRIGHTNESS);
        FastLED.setDither(DISABLE_DITHER);
        fill_solid(leds1, NUM_LED1, CRGB(0,0,0));
        fill_solid(leds2, NUM_LED2, CRGB(0,0,0));
        FastLED.show();

// OneSheeld interface via serial1
//Serial.begin(9600);
        OneSheeld.begin();
        Chart.autoScroll(ON);

        VoiceRecognition.setOnNewCommand(&VoiceCommand);
        PushButton.setOnButtonStatusChange(&ButtonChange);
        Slider.setOnValueChange(&SliderChange);

        State = IDLE; // HOMING ou MOTOR MOVE!
        LedState = CLOSED;

        TerminalQueue.push("Setup complete");

        ValveSet(0xFFFF);
        RegulatorSetPressure(21.3);
        delay(5000);
        ValveSet(0);
        memcpy(&Pressure,&PressureDosP2,sizeof(PressureDosP2[0])*15);
    }

void loop() {
    LoopTime = millis();

    LEDFlash();

    AdjustPressure();

    CheckTerminal(); // Check if a message was sent via terminal

    // Give feedback to user via OneSheeld app
    while(!TerminalQueue.isEmpty()){
        Terminal.println(TerminalQueue.pop()); // Write debug to terminal
    }
    while(!VoiceQueue.isEmpty()){
        TextToSpeech.say(VoiceQueue.pop()); // Speak-out feedback
    }
}

```

Annexe D – Proposition du matelas ajustable commercial

La Figure D-1 présente un exemple de conception pour celui-ci.

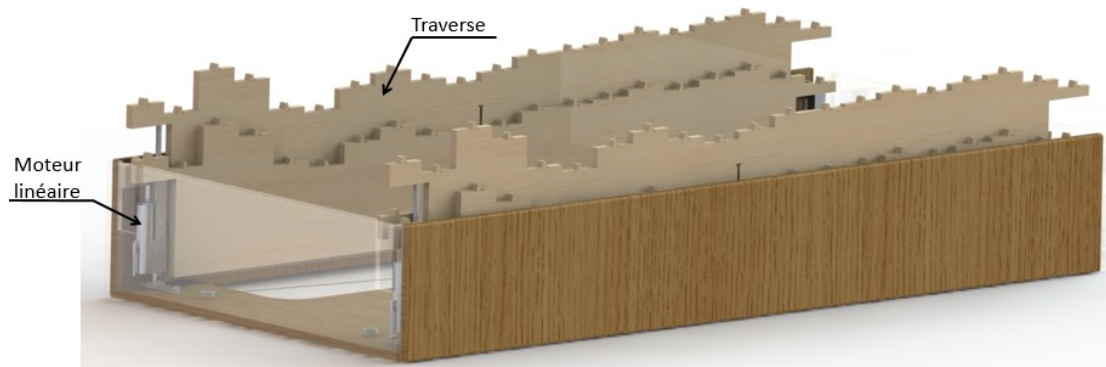


Figure D-1 : Exemple de conception d'une version future de lit ajustable à profils ajustables

Le fonctionnement du matelas se base sur l'alternance du choix de quatre traverses, pièces comportant longitudinalement le profil de l'utilisateur pour chaque position. Il existe quatre profils afin d'accommoder quatre positions possibles (dorsale, latéral, ventrale et personnalisé). La Figure D-2 représente une vue frontale du lit afin de mieux visualiser les profils produits. À des fins de représentations les lattes, l'utilisateur et la couche de confort ont été retirés des figures de ce chapitre.

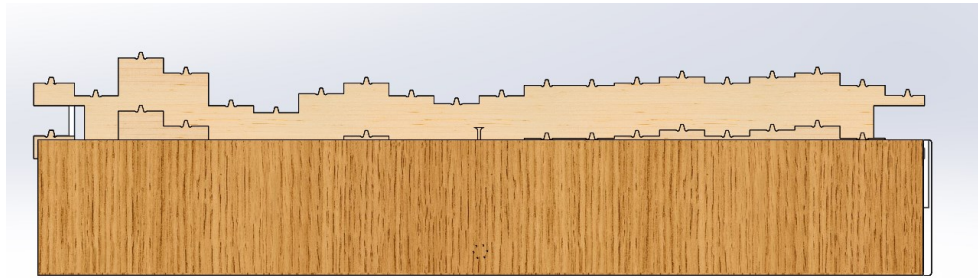


Figure D-2 : Vue de face de la version future de lit ajustable à profils ajustables

Le lit comporte ainsi huit traverses, soit un par côté par configuration. Les traverses sont poussées vers le haut grâce à des actionneurs linéaires, placés dans chaque coin du matelas. Le choix de la traverse se fait selon la position prise par l'utilisateur et est activé par un système comprenant un moteur rotatif (placé sur le centre du matelas) et quatre câbles. Les câbles tirent sur la base des moteurs linéaires, chacun fixé sur un guide linéaire, pour choisir la bonne traverse (Figure D-3).

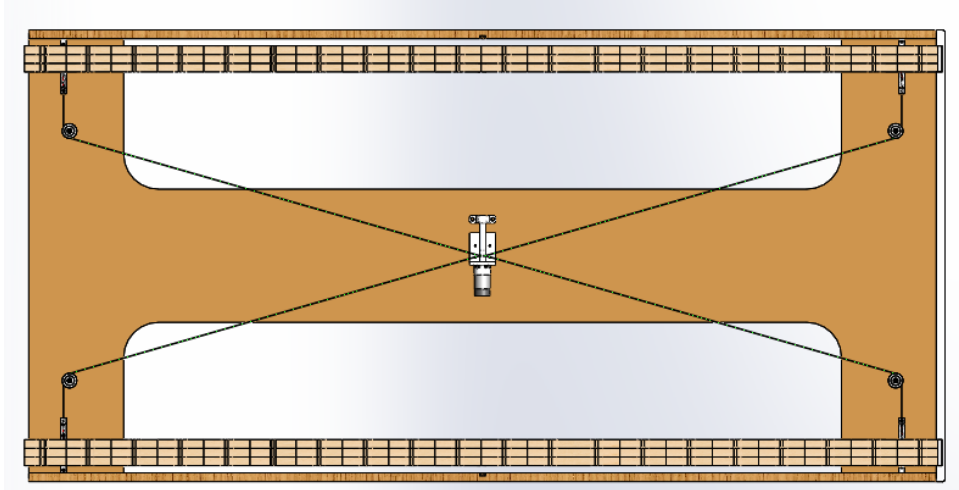


Figure D-3 : Vue de haut (à vol d'oiseau) de la version future de lit ajustable à profils ajustables

Bref, ce matelas permet de diminuer le nombre d'actionneurs à cinq (quatre moteurs linéaires et un moteur rotatif), afin de diminuer les coûts liés à l'automatisation (Figure D-4).

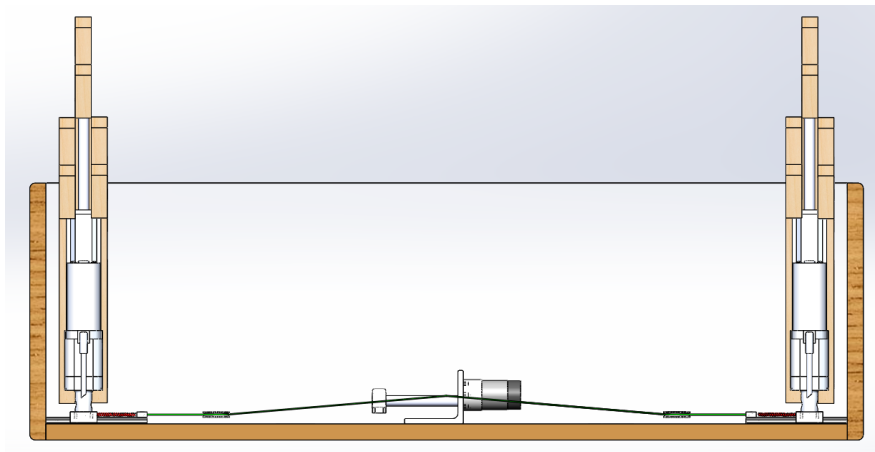


Figure D-4 : Vue de haut (à vol d'oiseau) de la version future de lit ajustable à profils ajustables

Ce matelas permet également de choisir une rigidité indépendante de l'atteinte du profil F_i , x_i en ajoutant une couche de confort sur le dessus les lattes. Un des principaux avantages est que les traverses sont personnalisées, et qu'aucune autre personne n'est autant confortable sur le matelas que le client lui-même.